

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**DIFERENCIAS EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS
DE MAMPOSTERÍA NO-REFORZADA. COMPARATIVA ENTRE
EDIFICIOS AISLADOS Y AGREGADOS.**



Memoria y Anexos

Autor: Mariona López Prats
Director: Jorge Arturo Ávila Haro
Convocatoria: Enero 2019

Resum

El present treball compara la resposta estructural entre diferents configuracions d'edificis de maçoneria no-reforçada ubicats a la zona de l'Eixample de Barcelona, prenent com a casos d'estudi un edifici aïllat i un agregat de dos edificis, en el qual la paret mitjana es comparteix entre els dos edificis que el conformen.

Es presenten les normatives per a la construcció sismoresistent i estudis relacionats per estimar les conseqüències de les accions d'un sisme en una estructura determinada. Es segueix una metodologia de treball per trobar el punt d'execució que es determina enfrontant la corba de capacitat i de demanda de l'edifici davant un terratrèmol. Per a cada hipòtesi de treball es determina aquest punt, el qual representa la vulnerabilitat de l'edifici i el dany que pot ocasionar-se en l'estructura.

L'obtenció de resultats s'ha realitzat mitjançant el programa de simulació Tremuri i posteriorment s'analitzen els resultats a partir del programa Matlab.

Finalment, s'ha observat que els edificis típics de maçoneria no-reforçada de l'Eixample no segueixen un disseny sismoresistent i davant l'amenaça d'un terratrèmol aquests edificis patirien importants danys en la seva estructura, ja que tendeixen a presentar un comportament més dúctil.

Darrera modificació d'aquest document: 10 de Gener de 2019

Resumen

El presente trabajo compara la respuesta estructural entre distintas configuraciones de edificios de mampostería no-reforzada ubicados en la zona del Eixample de Barcelona, tomando como casos de estudio un edificio aislado y un agregado de dos edificios, en el cual la pared medianera se comparte entre los dos edificios que lo componen.

Se presentan las normativas para la construcción sismorresistente y estudios relacionados para estimar las consecuencias de las acciones de un sismo en una estructura determinada. Se sigue una metodología de trabajo para encontrar el punto de desempeño que se determina enfrentando la curva de capacidad y de demanda del edificio ante un terremoto. Para cada hipótesis de trabajo se determina dicho punto, el cual representa la vulnerabilidad del edificio y el daño que puede ocasionarse en la estructura.

La obtención de los resultados se ha realizado mediante el programa de simulación Tremuri y posteriormente se analizan los resultados a partir del programa Matlab.

Finalmente, se ha observado que los edificios típicos de mampostería no-reforzada del Eixample no siguen un diseño sismorresistente y ante la amenaza de un terremoto dichos edificios sufrirían importantes daños en su estructura, ya que tienden a presentar un comportamiento más dúctil.

Última modificación de este documento: 10 de Enero de 2019

Abstract

This project it is about the study of the structural response between different configurations of non-reinforced masonry buildings located in the Eixample of Barcelona, taking as study cases an isolated building and two buildings added, in which boundary wall it is shared between the two buildings that compose it.

Regulations for earthquake-resistant construction and related studies are presented to estimate the consequences of the actions of an earthquake in a given structure. It is followed a methodology of work that consist in finding the performance point that is determined by facing the capacity and demand curve of the building when an earthquake occurs. For each hypothesis proposed, this point is determined, which represents the vulnerability of the building and the damage that may be caused in the structure.

The results was obtained through the Tremuri simulation program and after that the results are analysed in the Matlab program.

Finally, it has been observed that the typical buildings of non-reinforced masonry of the Eixample do not follow a seismic design and if an earthquake occurred those buildings would suffer significant damage in their structure, because they tend to present a more ductile behaviour.

Last Update of this document: 10th January 2019

Agradecimientos

Principalmente quiero agradecer el apoyo recibido por mi entorno familiar, especialmente a mis padres y mi hermana y también a mis amigos. Ellos me han ayudado a seguir motivada por mis estudios y poder lograr llegar hasta este punto.

Otra persona que ha sido fundamental ha sido mi tutor, Jorge Arturo Ávila Haro, ya que sin él nada de esto hubiera sido posible. Quiero agradecerle la ayuda y el tiempo que me ha dedicado para poder completar el Trabajo de Fin de Grado.

Glosario

Demanda sísmica: Se representa mediante el espectro de respuesta, el cual define la respuesta máxima producida por un sismo con respecto a una estructura.

Comportamiento plástico: Es la propiedad que presentan los materiales de volver a su estado inicial cuando se aplica una fuerza, su deformación no es permanente.

Comportamiento elástico: Es la propiedad que presentan los materiales de deformarse permanentemente e irreversiblemente cuando se somete el material a una fuerza por encima del rango elástico, el material no retorna a su estado inicial.

Límite elástico: Es la máxima tensión que un material elástico puede soportar sin sufrir deformación permanente.

Ductilidad: Es una propiedad mecánica de los materiales, al ser sometidos a una fuerza pueden deformarse plásticamente sin romperse. Estos materiales pueden romperse al superar grandes deformaciones.

Fluencia: Es la deformación irrecuperable de un material, sucede cuando se supera el límite elástico.

Capacidad sísmica: Representa los valores límites con respecto a los movimientos del terreno que puede soportar una estructura.

Análisis pushover: Consiste en someter una estructura a un perfil creciente de fuerzas laterales.

Método estático no lineal (*Nonlinear Static Procedures, NSP*): Método utilizado para determinar el punto de desempeño de una estructura.

Punto de desempeño: Punto de intersección entre la curva de demanda y capacidad sísmica, el cual define la vulnerabilidad de una estructura ante un sismo.

Fragilidad: Representa y cuantifica el daño que puede sufrir una estructura ante un sismo.

Mampostería no-reforzada: técnica de construcción mediante la cual las uniones de los elementos se realiza con mortero, el cual es un compuesto inorgánico mezclado con agua y otros aditivos.

Forjado: Tipo de construcción que permite distribuir las cargas en dirección vertical y horizontal para que una estructura pueda soportar su peso propio.

Bóveda: Elemento estructural de superficie curva en forma de arco que se utiliza como cubierta de un recinto amplio.

Bovedilla: Bóveda pequeña formada por ladrillos que se utiliza para cubrir el espacio entre dos vigas, permite reducir el peso de los forjados.

Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo	1
1.2. Motivación	1
1.3. Requerimientos previos.....	2
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo	3
2.2. Alcance del trabajo	3
3. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA	5
3.1. Barcelona	5
3.2. Plan Cerdá	6
3.3. Eixample.....	8
4. METODOLOGÍA	10
4.1. Demanda sísmica	10
4.1.1. Eurocódigo EC-8	12
4.1.2. Normativa Española.....	15
4.1.3. Estudio Irizarry	21
4.2. Capacidad sísmica	23
4.2.1. El programa de cálculo: TREMURI	24
4.3. Método estático no lineal.....	26
4.3.1. Método ATC-40.....	26
4.3.2. Método N2	29
4.4. Fragilidad.....	33
5. LOS EDIFICIOS	35
5.1. Características constructivas de los edificios del Eixample	37

5.2.	Modelado del edificio	40
5.2.1.	Modelado del Edificio 1.....	41
5.2.2.	Modelado del Edificio 2.....	43
6.	CÁLCULO Y RESULTADOS	45
6.1.	Análisis modal	45
6.1.1.	Resultados del análisis modal para el Edificio 1.....	45
6.1.2.	Resultados del análisis modal para el Edificio 2.....	47
6.1.3.	Resultados del análisis modal para el Agregado.....	49
6.2.	Análisis estático no lineal.....	50
6.2.1.	Primera hipótesis: Edificio 1	50
6.2.2.	Primera hipótesis: Edificio 2	55
6.2.3.	Segunda hipótesis: Edificios Agregados	60
6.2.4.	Comparativa entre el Edificio 1 y el Agregado	65
6.2.5.	Comparativa entre el Edificio 2 y el Agregado	67
6.3.	Fragilidad	69
6.3.1.	Primera hipótesis: Edificio 1	69
6.3.2.	Primera hipótesis: Edificio 2	73
6.3.3.	Segunda hipótesis: Edificios Agregados	76
7.	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	81
8.	CONCLUSIONES	83
9.	PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO	86
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXO A	91
A1.	Representación gráfica de los resultados del Análisis estático no lineal en el Edificio 1 aislado.....	91
A2.	Representación gráfica de los resultados del Análisis estático no lineal en el Edificio 2 aislado.....	102
A3.	Representación gráfica de los resultados del Análisis estático no lineal en el Agregado	114
A4.	Gráficas de los resultados de Fragilidad en el Edificio 1 aislado.....	126
A5.	Gráficas de los resultados de Fragilidad en el Edificio 2 aislado	134
A6.	Gráficas de los resultados de Fragilidad en el Agregado	142
A7.	Curvas de capacidad	150

A8. Contribución de los nodos de la pared al total del cortante	153
---	-----

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

La realización del presente trabajo tiene su origen a partir de la propuesta del profesor Jorge Arturo Ávila Haro. Uno de los ámbitos que más han sido de mi interés en el Grado de Ingeniería Mecánica ha sido el de resistencia de materiales y estructuras, es por este motivo que mi deseo era realizar un proyecto sobre esta temática.

1.2. Motivación

La principal motivación para realizar el trabajo ha sido el tema escogido, ya que está relacionado con el diseño y la resistencia de estructuras y ha sido una de las materias que más me ha gustado en todo el grado y espero en un futuro dedicarme a ello.

El tema propuesto para este trabajo me pareció curioso ya que normalmente los problemas realizados en clase se basan en fuerzas puntuales o cargas uniformemente distribuidas en una estructura. El hecho de estudiar las fuerzas que provoca un terremoto me pareció interesante, porque es una manera de entender lo estudiado en el grado, pero aplicando un tipo de carga diferente sobre una estructura. Además, son unas fuerzas importantes y nunca se me había planteado un problema en clase para construir una estructura a partir de dichas fuerzas.

Otro punto que me llamo la atención es el factor de riesgo que provoca un terremoto, ya que puede causar grandes pérdidas a nivel material y personal. Al poder evaluar el estado y las consecuencias que conllevaría un sismo me ha hecho entender las construcciones realizadas hace más de 50 años. Especialmente al ser construcciones de la zona del Eixample de Barcelona dónde diariamente pasean muchísimas personas, incluyéndome a mí.

1.3. Requerimientos previos

Para poder realizar el trabajo me han requerido los conocimientos de las materias cursadas durante el Grado de Ingeniería Mecánica. En concreto las materias que debía dominar han sido Elasticidad, Resistencia de Materiales, Estructuras y Construcciones Industriales y Materiales.

A nivel informático he tenido que profundizar mis conocimientos en Autocad y Matlab, para de este modo poder interpretar los planos en 2D de los edificios de estudio y procesar y realizar los cálculos con los datos obtenidos. Además, he tenido que aprender el funcionamiento básico del programa de simulación Tremuri, ya que nunca lo había utilizado.

Además, se me ha requerido tener un buen dominio de los programas de Microsoft, como el Word, PowerPoint y Excel, ya que son la base de presentación de trabajo y con ellos se ha elaborado la memoria técnica.

2. Introducción

2.1. Objetivos del trabajo

El objetivo del trabajo es representar las diferencias en la respuesta estructural de un edificio determinado de mampostería no-reforzada ubicado en la zona del Eixample de Barcelona. Se quiere realizar la comparativa entre dos hipótesis de trabajo, la primera plantea el edificio completamente aislado y la segunda plantea el edificio compartiendo pared medianera con uno de los edificios de su costado.

Se emplea el método estático no lineal llamado N2, con el cual se evaluará el desempeño de la estructura cuando se enfrenta a una demanda sísmica. Con esto se quiere estimar el daño que sufrirá un edificio del Eixample ante la acción de un terremoto plausible en dicha área.

2.2. Alcance del trabajo

Primeramente, el trabajo incluye el contexto histórico que explica y define como se construyó el Eixample. Se presenta la distribución de la ciudad vieja de Barcelona y cómo nace la zona del Eixample a partir de la aprobación del Pla Cerdà, el cual fue un proyecto innovador para la época.

Seguidamente, se presenta la metodología de trabajo que se va a aplicar para obtener e interpretar los resultados. Se explican las normativas que influyen para determinar la demanda sísmica y cuál de ellas se aplica en este trabajo, se define la capacidad sísmica a partir del análisis *pushover*, se define el método estático no lineal (*Nonlinear Static Procedures*, NSP) que se va a utilizar para obtener los resultados y finalmente, se determinan los estados de daño de la estructura a partir de la fragilidad.

Se definen los edificios típicos que conforman el Eixample y se presentan los edificios de estudio, en este caso se distinguen con los nombre de 'Edificio' y 'Edificio 2'.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación con el programa Tremuri y el post-procesado de datos con el programa Matlab. Se concluye el trabajo a partir de las dos hipótesis planteadas.

3. Introducción Histórica

A continuación se detalla la evolución a nivel urbano que ha ido experimentando Barcelona a lo largo de la historia. Se presenta la estructura antigua de los diferentes distritos que formaban dicha ciudad, cuando aún estaba rodeada por las murallas. Seguidamente, se presenta el plan de reforma urbanística, el Plan Cerdà, con el cual se pretendía ampliar y organizar la ciudad. Finalmente, se expone el resultado de aplicar dicho plan y cómo se confeccionó la zona del Eixample.

3.1. Barcelona

Antes de la aprobación del Plan Cerdà, Barcelona concentraba toda su población en el territorio comprendido dentro de las murallas. La zona que quedaba dentro de la muralla estaba formada por los siguientes barrios: la Barceloneta, el Raval, el Gótico y Sant Pere, Santa Caterina y la Ribera. Actualmente dicho territorio forma el centro histórico de la ciudad (Ayuntamiento de Barcelona).

La Barceloneta fue el barrio que se construyó más tarde, creado a mediados del siglo XVIII. El barrio se creó con el fin de alojar a aquellas familias que vivían en la zona de la Ciudadela en la Ribera, ya que se habían derribado sus casas con el objetivo de construir la Ciudadela. El plan urbanístico para la zona de la Barceloneta preveía la construcción de casas con planta baja y un piso que conformaran islas rectangulares alargadas y estrechas (Ayuntamiento de Barcelona).

El Raval primeramente era una zona formada por campos agrícolas que fue cambiando su aspecto paralelamente a los cambios sociales, económicos y políticos que iban sucediendo en la época. Entre el siglo XV y principios del siglo XIX se empezaron a construir diferentes conventos de órdenes religiosas debido al Concilio de Trento (1543 – 1563). Además, con la industrialización a principios del siglo XVIII, se instalaron diferentes industrias, eso hizo que el Raval fuera una mezcla de fábricas y casas para alojar a los trabajadores de dichas fábricas (Ayuntamiento de Barcelona).

El Gótico es el barrio más antiguo de Barcelona y representaba el centro de la vida política. Durante el siglo XVIII se aprovecharon las casernas para transformarlas en pisos irregulares con mala iluminación y poca ventilación debido al crecimiento de población de la época (Ayuntamiento de Barcelona).

Sant Pere, Santa Caterina y la Ribera se creó a partir del siglo XI por la necesidad de expandir la ciudad de Barcelona fuera del núcleo romano. Parte del barrio conserva su estructura medieval con calles estrechas y entrelazadas dónde a partir de la segunda mitad del siglo XVIII se vio transformada por la construcción de fábricas dedicadas al ámbito textil (Ayuntamiento de Barcelona).

En la Figura 3.1.1. se puede observar la ubicación y dimensiones actuales de los cuatro barrios que quedaban ubicados dentro de las murallas.

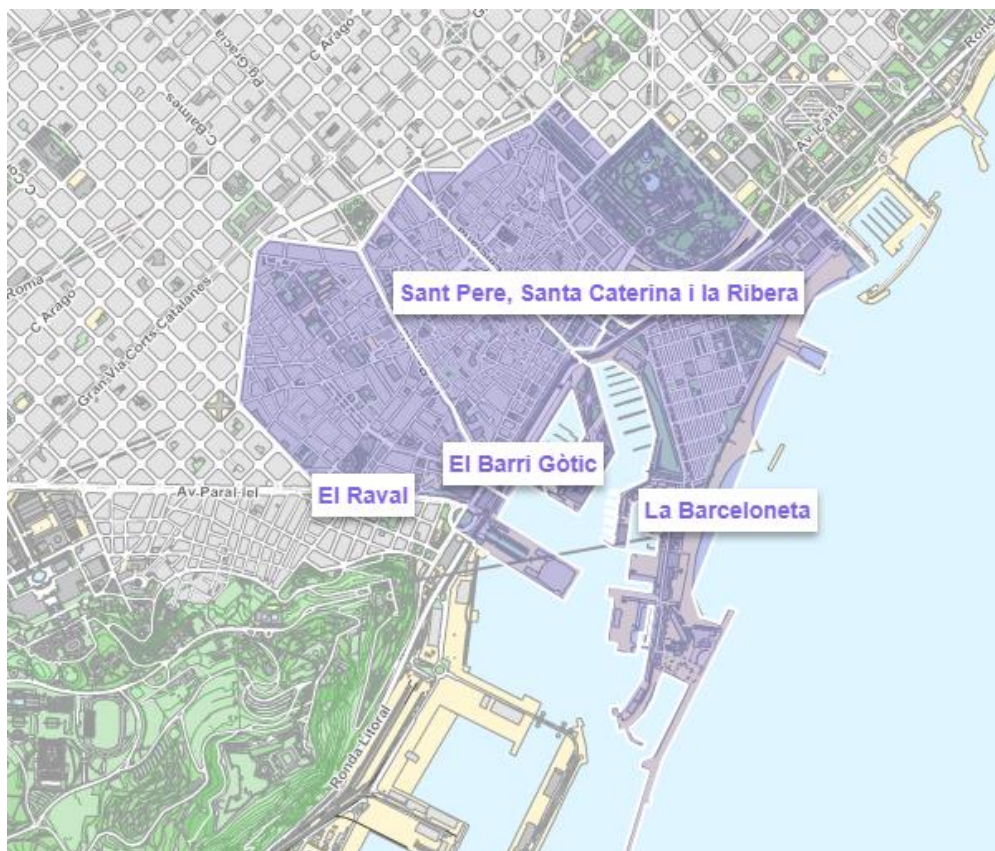


Figura 3.1.1. Distribución de los barrios actualmente (Fuente: Ayuntamiento de Barcelona)

3.2. Plan Cerdá

El Plan Cerdá surgió de la necesidad de adaptar la ciudad de Barcelona a los diferentes acontecimientos sociales, políticos y económicos que estaban sucediendo a principios de siglo XIX. La ciudad antigua, la cual se ubicaba dentro de la muralla, ya no tenía capacidad para alojar a todos los habitantes de Barcelona. Es por ese motivo que se propuso la expansión de la ciudad fuera de la muralla. De este modo se quería lograr unas mejoras en la vida cotidiana de los habitantes de la ciudad, ya que en la ciudad antigua había una gran falta de condiciones higiénicas de las viviendas y de recursos públicos para garantizar el adecuado desarrollo de la vida urbana ("Barcelona y el Plan Cerdá" 1960).

El plan consistía en unos bloques con calles de 20m de ancho y chaflanes de 20m de longitud, Cerdá los ideó con el objetivo de facilitar la circulación interurbana (Figura 3.2.1.). De este modo organizó la ciudad en una malla con islas idénticas con una forma ortogonal. La dirección en la que orientó las

calles la basó a partir de la iluminación y los vientos dominantes que podían afectar a las calles. Además incluyó vías trascendentales de 50m de ancho, como son actualmente la Diagonal, la Meridiana y el Paralelo (“Barcelona y el Plan Cerdá ” 1960).

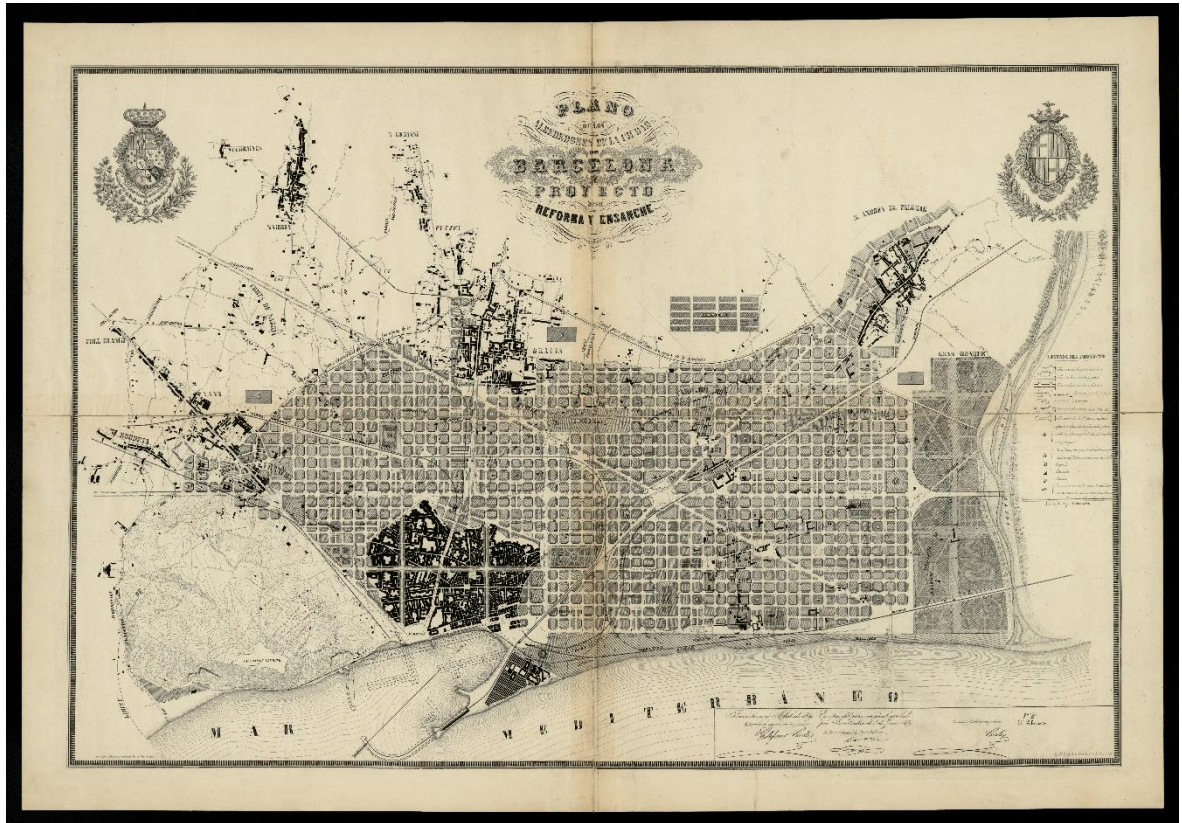


Figura 3.2.1. Plano de Barcelona para el proyecto de reforma y ensanche 1861 (Fuente: Cartoteca Digital)

La primera idea del proyecto de 1859 era construir sólo dos lados de la manzana, con edificios de tres a cuatro pisos y con un máximo de siete viviendas por edificio. El resto de terreno que quedaba en la manzana sería destinado a zonas verdes. Finalmente, se edificó toda la manzana con edificios de seis pisos más planta baja. Con lo cual del proyecto inicial que estipulaba unos 16m de altura se pasaron a edificios de 28m y a veces hasta 30m de altura (“Barcelona y el Plan Cerdá ” 1960).

3.3. Eixample

La aprobación del Plan Cerdá en 1890 fue el punto de partida para comenzar a construir lo que actualmente se conoce como el Eixample. El proyecto se inició a mediados de siglo XIX con el derribo de los muros (1858 – 1868) que rodeaban la ciudad Vieja de Barcelona.

Finalmente los conjuntos de edificios que se construyeron estaban agrupados en islas o manzanas prácticamente simétricas, con una superficie aproximada de 113x113m y con cuatro esquinas en forma de chaflán de 20 m de lado cada una. De esta forma se fue construyendo el Eixample de Barcelona e impulsó el crecimiento de dicha ciudad (Serratosa s.f.).

Seguidamente se muestra una comparativa entre como quedó diferenciada la estructura urbanística entre el Eixample y la ciudad Vieja (Figura 3.3.1. y Figura 3.3.2.):

- Diferencias entre la distribución de las calles:

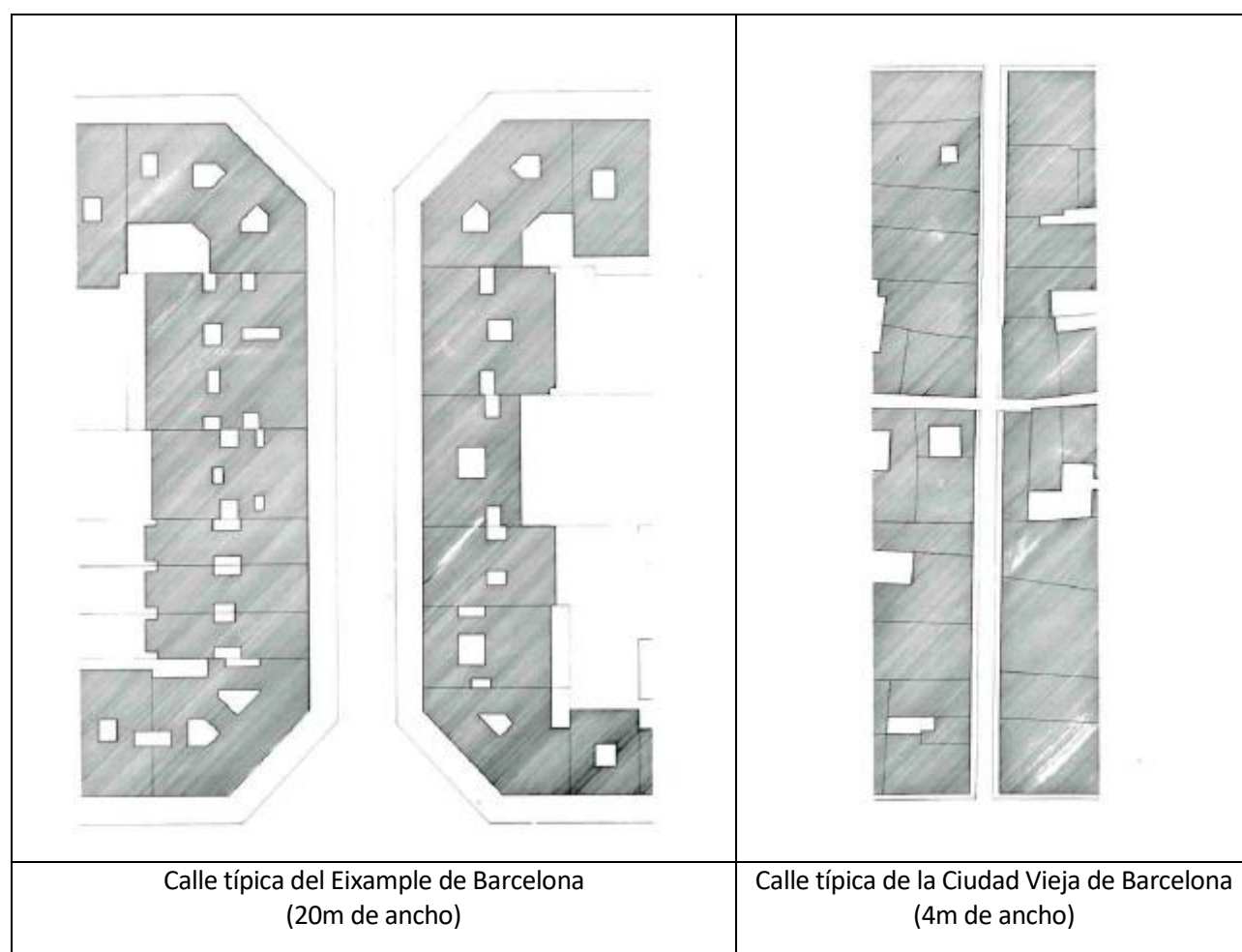


Figura 3.3.1. Comparativa entre la distribución de las calles (Fuente: Serratosa s.f.)

- Diferencias entre la distribución de islas o manzanas de edificios:

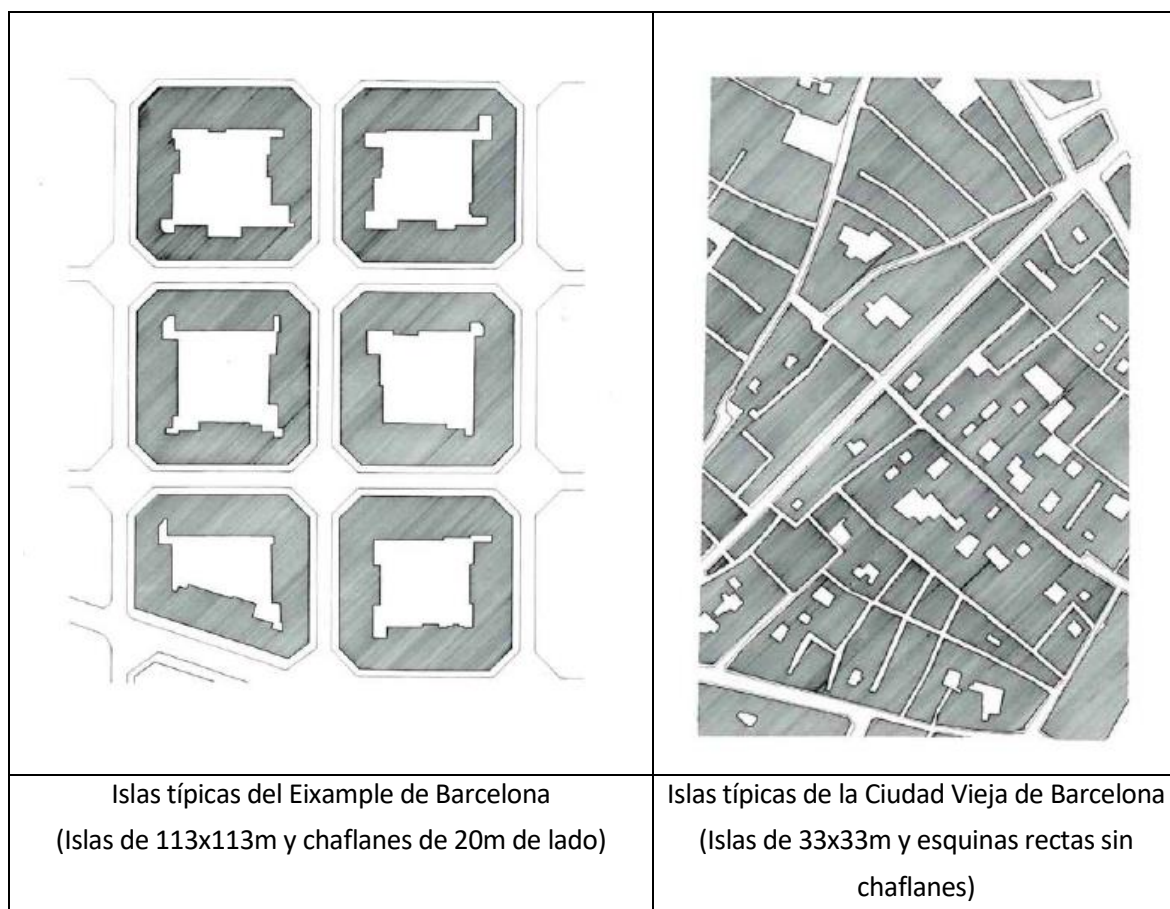


Figura 3.3.2. Comparativa entre la distribución de las islas de edificios (Fuente: Serratosa s.f.)

4. Metodología

En este apartado se explica a nivel teórico la metodología de trabajo que se va a aplicar para posteriormente analizar e interpretar los resultados. Los puntos que se definen son la demanda sísmica, la capacidad sísmica, el método estático no lineal y la fragilidad.

4.1. Demanda sísmica

La demanda sísmica es representada por el concepto conocido como el espectro de respuesta. El espectro de respuesta se define gráficamente mediante la respuesta máxima producida por un sismo con respecto a una estructura. Dicha estructura es simplificada como un oscilador con un solo grado de libertad. La respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento viene dada en función del periodo propio de la estructura (Crisafulli y Vilafañe 2002).

Para definir el espectro de respuesta se consideran varias estructuras de un grado de libertad con diferentes periodos de vibración (T) y con un factor de amortiguamiento igual. Al someter las estructuras a diferentes acciones sísmicas la respuesta obtenida, mediante el registro de aceleraciones ($u(t)$), es diferente. A partir de este procedimiento se determinan los valores máximos para cada una de las estructuras en función del periodo de vibración y finalmente construir el espectro de respuesta (Crisafulli y Vilafañe 2002).

En la Figura 4.1.1. se puede ver de forma esquemática el proceso utilizado para determinar el espectro de respuesta:

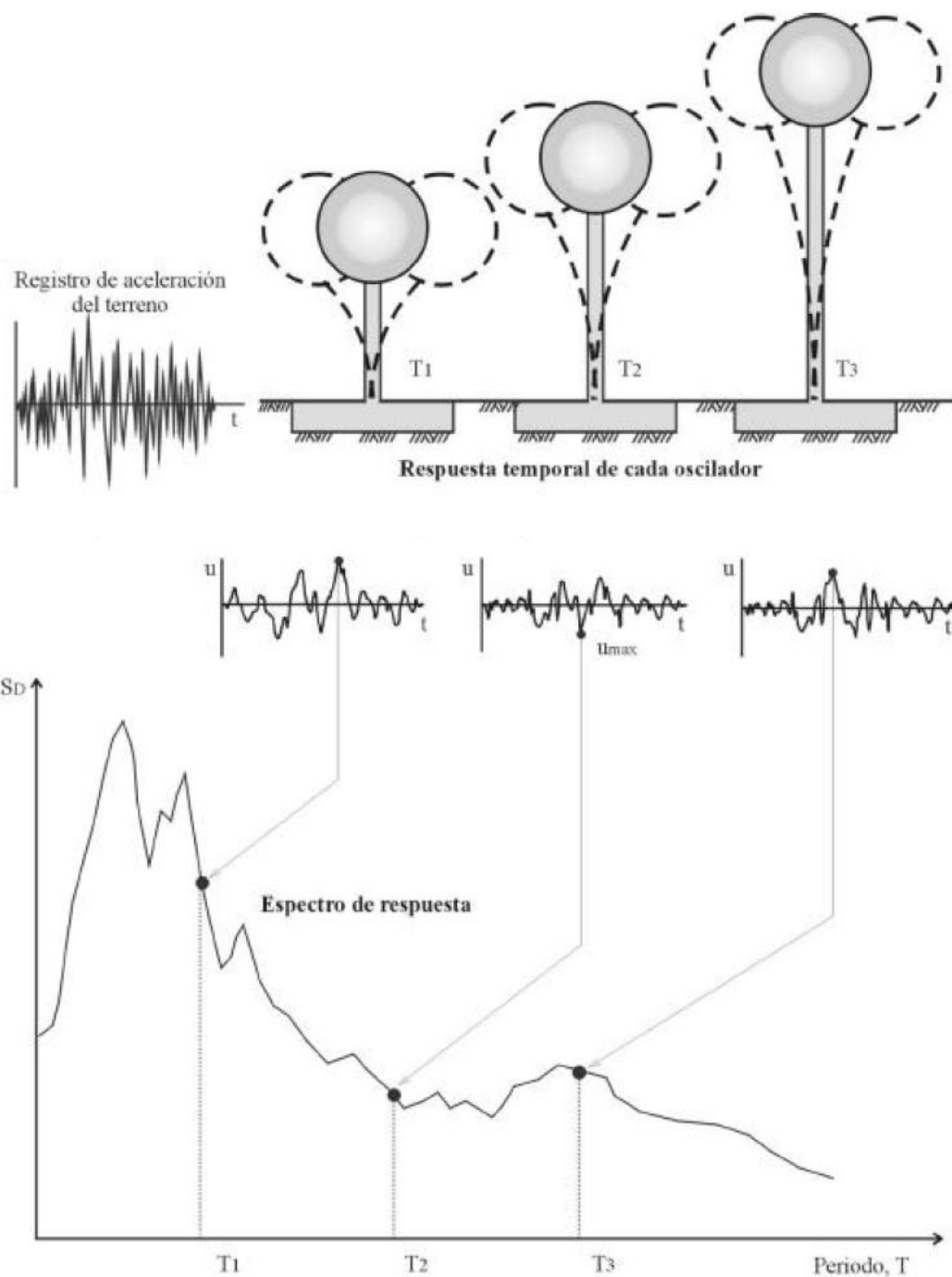


Figura 4.1.1. Proceso para determinar el espectro de respuesta (Fuente: Crisafulli y Vilafañe 2002)

Se puede trabajar con espectros de respuesta elástica, los cuales representan los parámetros de respuesta máxima en un determinado terremoto. Estos espectros permiten estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas que forman estos espectros presentan variaciones bruscas entre los picos y los valles que son resultado del registro de aceleraciones del terremoto (Crisafulli y Vilafañe 2002).

Por otro lado, existen espectros de respuesta inelástica. Dichos espectros parten de la suposición que el oscilador de un grado de libertad tiene un comportamiento no-lineal, la estructura presenta deformaciones en el rango plástico al experimentar un terremoto. Estos espectro representan la ductilidad demandada por un terremoto en función del periodo de vibración de la estructura y se puede graficar para distintos niveles de resistencia. Además, permite representar los espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último del sistema inelástico con distintos niveles de ductilidad o comportamientos en la estructura (Crisafulli y Vilafañe 2002).

El presente trabajo presenta la demanda a partir de dos normativas, el Eurocódigo EC-8 y la Normativa española NCSE-02, esta última será la base de cálculo para realizar el trabajo. Además, se incluye el estudio de Irizarry (Irizarry 2004). Para evaluar la demanda sísmica en el trabajo se utilizará la demanda definida a partir de la Norma NCSE-02, ya que es la que regula y controla las construcciones sismorresistentes en el territorio español. No es objeto de este trabajo hacer una comparativa entre los documentos indicados, existen estudios que ya lo han hecho.

4.1.1. Eurocódigo EC-8

En 1975 la Comisión Europea creó una norma para unificar los criterios de construcción de estructuras con el objetivo de lograr la resistencia de dichas estructuras ante un terremoto. En 1998 se aprobó el Eurocódigo 8 (EC-8) dónde se encuentran las reglas generales, los principios de diseño de edificios y las diferentes acciones sísmicas (“European Standard Europäische Norm” 2004).

La norma estipula que los edificios deben ser diseñados y construidos para que cumplan el criterio de no colapso y las limitaciones de daño, es decir, la estructura tiene que soportar la acción sísmica teniendo en cuenta la mayor probabilidad de ocurrencia (“European Standard Europäische Norm” 2004). Por este motivo la normativa divide el terreno en las siguientes categorías dependiendo de sus características:

Tipo de terreno	Descripción	$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (golpes/30cm)	C_u (kPa)
A	Roca u otro tipo de roca con al menos 5m en la superficie de material más débil	> 800	-	-
B	Depósitos de arena muy densa, grava o barro duro, de al menos varias decenas de metros de espesor, con un aumento gradual de las propiedades mecánicas según la profundidad	360 – 800	> 50	> 250

C	Depósitos profundos de arena densa o medio densa, grava o barro rígido con espesor de varias decenas hasta centímetros de metros	180 – 360	15 – 50	70 – 250
D	Depósitos de suelo cohesivo de suelto a medio o de suelo cohesivo de blando a firme	< 180	< 15	< 70
E	Suelo con una capa de aluvión superficial (de arena, grava o barro) , de valores de tipo C o D y grosor de aproximadamente entre 5m y 20m, combinado con un material más rígido con $v_s > 800\text{m/s}$	-	-	-

Tabla 4.1.1.1. Clasificación del terreno (Fuente: “European Standard Europäische Norm” 2004).

Donde:

$V_{s,30}$ (m/s): Velocidad promedio de propagación de las ondas.

N_{SPT} (golpes/30cm): Recuento de golpes mediante la prueba estándar de penetración (*Standard Penetration Test*).

C_u (kPa): Resistencia a la fuerza cortante de suelos sin drenar.

Además de tener en cuenta el tipo de terreno dónde se ubican los edificios, la normativa europea contempla la aceleración horizontal y los movimientos causados por las acciones sísmicas en las tres componentes espaciales.

El Eurocódigo 8 permite realizar una representación básica de la acción sísmica. El movimiento sísmico en un punto de la superficie está representado por un espectro de respuesta de aceleración elástica del terreno, este punto se nombra espectro de respuesta elástica. La acción sísmica horizontal se describe mediante dos componentes ortogonales, consideradas independientes y que son representadas por el mismo espectro de respuesta (“European Standard Europäische Norm” 2004). El EC-8 define las siguientes expresiones para definir la respuesta elástica $S_e(T)$:

$0 \leq T \leq T_B$:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$T_B \leq T \leq T_C$:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

Ecuación 4.2

$T_C \leq T \leq T_D$:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

Ecuación 4.3

$T_D \leq T \leq 4s$:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

Ecuación 4.4

Donde:

$S_e(T)$: Espectro de respuesta elástica.

T : Periodo de vibración de la estructura de un solo grado de libertad (SDOF).

a_g : Aceleración del diseño del terreno de tipo A, que se calcula con la expresión $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$.

γ_1 : Factor de importancia.

T_B : Periodo característico que define el inicio de aceleración constante.

T_C : Periodo característico que define el inicio de la velocidad constante.

T_D : Periodo característico que define el inicio del desplazamiento constante.

S : Factor del terreno.

η : Coeficiente de amortiguamiento, $\eta=1$ cuando el amortiguamiento es de un 5%.

En la Figura 4.1.1.1. se presenta la forma que debe seguir el espectro de respuesta según los parámetros que define el EC-8. De este modo se crea una metodología común de referencia para todos los Estados Miembros de la Unión Europea.

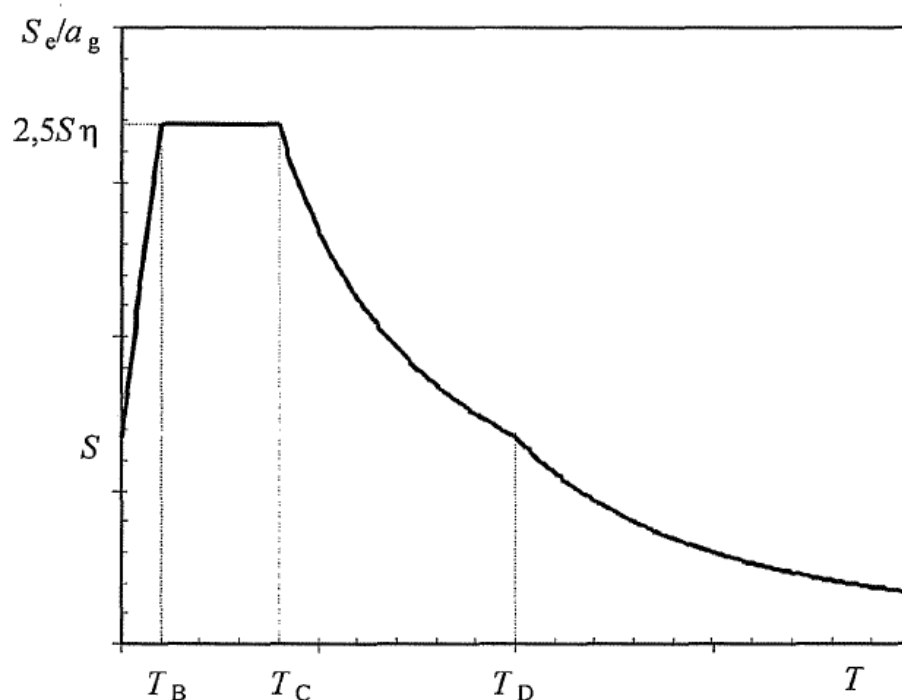


Figura 4.1.1.1. Forma del espectro de respuesta elástica según el EC-8 (Fuente: “European Standard Europäische Norm” 2004).

4.1.2. Normativa Española

En España, a nivel normativo, la demanda sísmica no se tuvo en cuenta para la construcción de edificios públicos y particulares hasta el siglo XX. En el caso de estudio, los edificios construidos en el Eixample, no se contemplaba ninguna normativa en todo el territorio para la edificación de dichos edificios. Cabe destacar que España no está ubicada en una zona de alta sismicidad (Ministerio de Fomento).

No fue hasta 1962 que se creó una Comisión Interministerial que tuvo como objetivo la redacción de la Norma Sismorresistente P.G.S.-1 aprobada en 1968. El motivo por el cual se decidió crear una normativa que contemplara los daños que pudiera crear un sismo en el territorio español fueron los antecedentes históricos que se vivieron previamente a la redacción de la normativa. Son ejemplos los terremotos de Torrevieja (1829) y el de Andalucía (1884), como consecuencia de dichos sucesos se ocasionaron importantes daños materiales y la pérdida de muchas vidas (Ministerio de Fomento).

La Norma Sismorresistente P.G.S.-1 (1968) estableció los criterios de cálculo para la construcción de cualquier tipo de edificio y se incluyó un mapa dónde se dividía el territorio español en tres zonas según la intensidad de las acciones sísmicas. En el caso de Barcelona, el territorio se consideró de Zona B, es decir, una zona de sismicidad media, por lo tanto ante un sismo se podrían ocasionar desperfectos en las construcciones (Presidencia del Gobierno 1969). Posteriormente, en 1974 fue aprobada una nueva

Norma Sismorresistente P.D.S-1 que obligaba el cumplimiento de la norma en cuestión, basándose en la zonificación del mapa de España según la intensidad de las acciones sísmicas y los métodos de cálculo, junto a recomendaciones, para la construcción de cualquier tipo de estructura (Ministerio de planificación del Desarrollo 1974). Seguidamente, en 1994 se redactó la Norma de Construcción Sismorresistente Española, NCSE-94, que ofrecía un estudio más detallado del método de cálculo a seguir, tanto para construcciones nuevas como para estructuras a reformar o rehabilitar. Además, incluía un mapa de España dónde se indicaban los diferentes niveles de peligrosidad sísmica basados en las diferentes aceleraciones sísmicas básicas máximas, es decir, dicho parámetro define la aceleración horizontal de la superficie del terreno (Ministerio de Fomento 2002).

Finalmente, el texto normativo vigente actualmente es la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 aprobada el octubre de 2002. La norma define el ámbito de aplicación de la siguiente manera según la clasificación de las construcciones dependiendo del uso que se destina al edificio (Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 2002):

- **Importancia moderada:** con probabilidad despreciable de que su destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario, o producir daños económicos significativos a terceros.
- **Importancia normal:** cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos.
- **Importancia especial:** Aquellas cuya destrucción por el terremoto, pueda interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos. En este grupo se incluyen las siguientes construcciones:
 - Hospitales y centros sanitarios de cierta importancia.
 - Edificios e instalaciones básicas de comunicación.
 - Edificios para centros de organización y coordinación de funciones en casos de desastres.
 - Edificios de personal y equipos de ayuda.
 - Construcciones para instalaciones básicas de las poblaciones.
 - Estructuras pertenecientes a vías de comunicación.
 - Edificios e instalaciones vitales de los medios de transporte.
 - Edificios e instalaciones industriales incluidos en el ámbito de aplicación del Real Decreto 1254/1999.
 - Grandes construcciones de ingeniería civil.
 - Construcciones catalogadas como monumentos históricos o artísticos.
 - Construcciones destinadas a espectáculos públicos y superficies comerciales.

El cumplimiento de la Norma es obligatoria exceptuando en los siguientes casos:

- Construcciones de importancia moderada.
- Edificaciones de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica (a_b) sea inferior a 0,04g (g representa el valor de la gravedad).
- Construcciones de importancia normal con pórticos que contribuyen a dar estabilidad a la estructura cuando la aceleración sísmica básica (a_b) sea inferior a 0,08g, si los edificios son de más de siete plantas se debe aplicar la Norma cuando su aceleración sísmica sea igual o superior a 0,08g.

Para determinar la demanda sísmica se deben seguir los métodos que vienen estipulados en la normativa NSCE-02 (Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 2002), se debe seguir el siguiente procedimiento de cálculo para determinar los diferentes parámetros que definen la demanda sísmica:

- La **aceleración sísmica** (a_c) es el valor de la aceleración horizontal del terreno y se define a continuación:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde:

a_b : Aceleración sísmica básica, en el caso del Eixample la aceleración es de 0,04g, donde g es el valor de la gravedad.

ρ : Coeficiente adimensional de riesgo, en el caso del Eixample al ser considerado una construcción normal toma el valor de $\rho=1$.

S : Coeficiente de amplificación del terreno que depende de los siguientes parámetros:

Para $\rho \cdot a_b \leq 0,1g$:

$$S = \frac{C}{1,25} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Para $0,1g < \rho \cdot a_b < 0,4g$:

$$S = \frac{C}{1,25} + 3,33\left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0,1\right)\left(1 - \frac{C}{1,25}\right) \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Para $0,4g \leq \rho \cdot a_b$

$$S = 1,0 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde:

C: Coeficiente de terreno que depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación, se explicará más adelante el valor que corresponde a dicho coeficiente.

En la normativa NCSE-02 se adjunta un mapa de peligrosidad sísmica para todo el territorio español, se muestra a continuación en la Figura 4.1.2.1.:

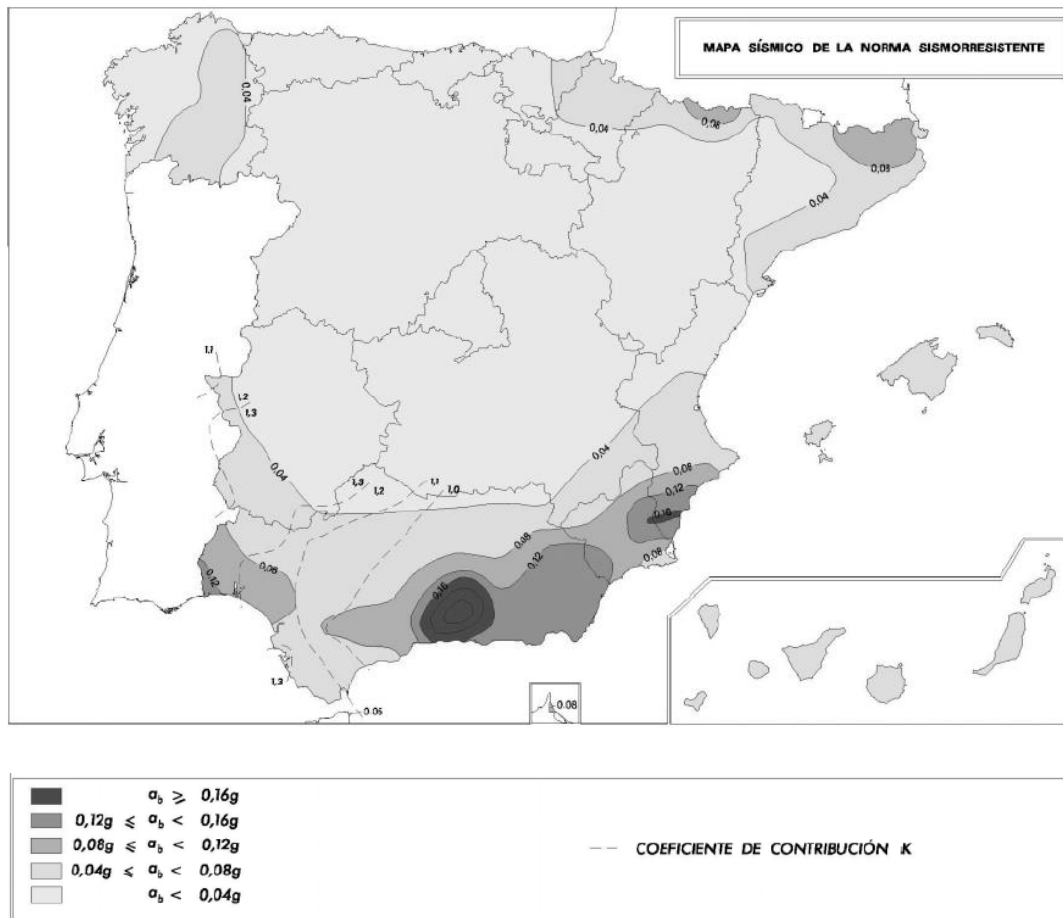


Figura 4.1.2.1. Mapa de peligrosidad (Fuente: Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 2002)

- El **espectro de respuesta elástica** es un valor normalizado de respuesta elástica en la superficie del terreno (Figura 4.1.2.2.) y se determina de la siguiente forma:

$$\text{Si } T < T_A \quad \alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot \frac{T}{T_A} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Si $T_A < T < T_B$

$$\alpha(T) = 2,5 \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Si $T > T_B$

$$\alpha(T) = K \cdot \frac{C}{T} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Donde:

$\alpha(T)$: Valor del espectro normalizado de la respuesta elástica.

T : Período propio del oscilador en segundos.

K : Coeficiente de contribución, en el caso del Eixample $K = 1$.

C : Coeficiente del terreno.

T_A, T_B : Períodos característicos del espectro de respuesta que se calculan:

$$T_A = K \cdot \frac{C}{10} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

$$T_B = K \cdot \frac{C}{2,5} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Finalmente, el espectro de respuesta elástica que define la normativa española queda representada de la siguiente forma (Figura 4.1.2.2.):

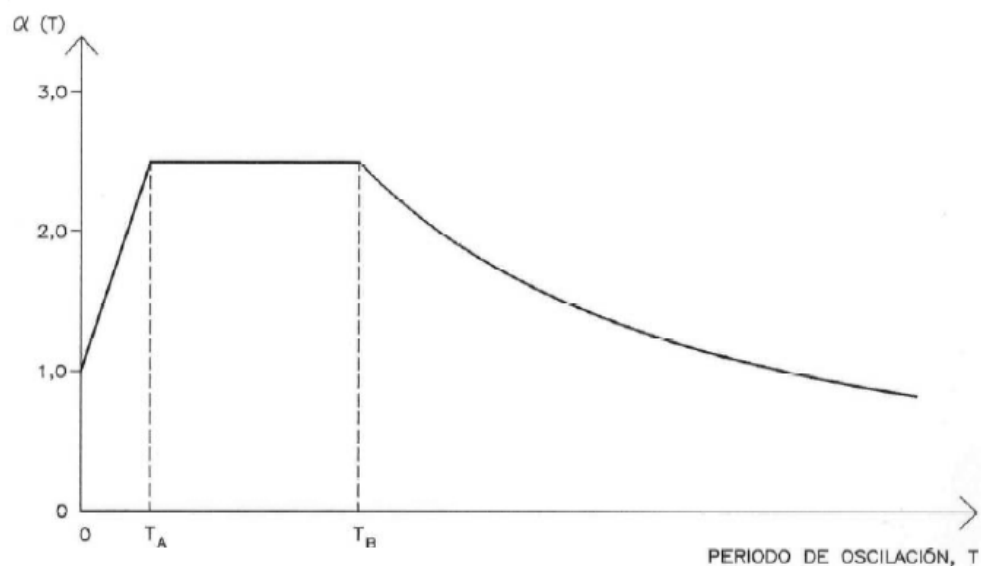


Figura 4.1.2.2. Espectro de respuesta elástica (Fuente: Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 2002)

- Clasificación del terreno, **coeficiente del terreno**, según la norma dependiendo de las características geotécnicas del terreno de cimentación se clasifican de la siguiente forma:

Tipo de terreno	Definición	Velocidad de propagación de las ondas transversales o de cizalla (V_s)	Coeficiente del terreno (C)
I	Roca compacta Suelo cementado Suelo granular muy denso	$>750\text{m/s}$	1,0
II	Roca muy fracturada Suelos granulares densos Suelos cohesivos duros	$750\text{m/s} \geq V_s > 400\text{m/s}$	1,3
III	Suelo granular de compacidad media Suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	$400\text{m/s} \geq V_s > 200\text{m/s}$	1,6
IV	Suelo granular suelto Suelo cohesivo blando	$V_s \leq 200\text{m/s}$	2

Tabla 4.1.2.1. Clasificación del terreno (Fuente: Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 2002)

En el caso de estudio para edificios ubicados en el Eixample según la Tabla 4.1.2.1. el tipo de terreno que se escoge es el tipo III, es decir, con un coeficiente del terreno de valor 1,6.

Una vez encontrados todos los parámetros comentados anteriormente se puede realizar una representación gráfica de la curva de demanda (Figura 4.1.2.3.), la zona bajo la curva de demanda engloba todos los casos registrados de demanda sísmica.

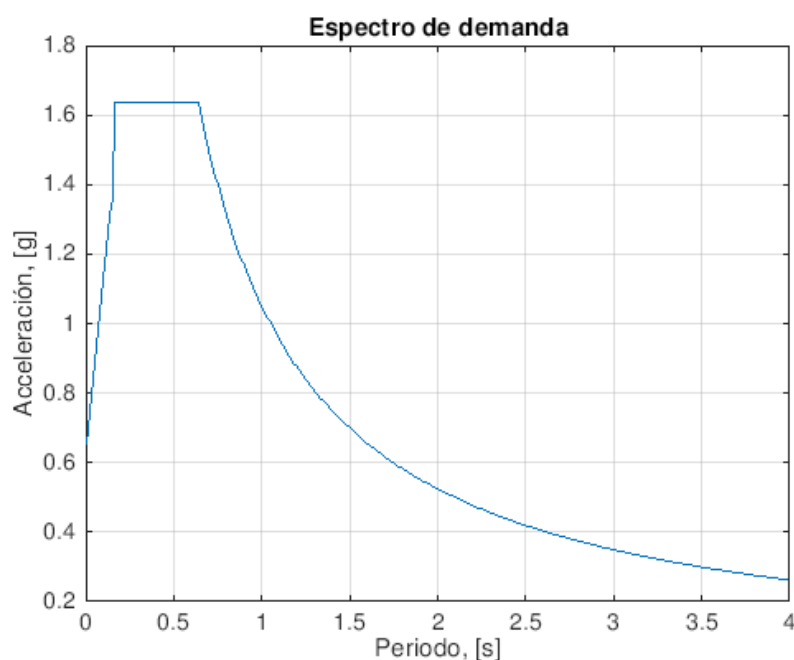


Figura 4.1.2.3. Ejemplo de Espectro de Demanda (Fuente: Propia)

El espectro de demanda, generalmente, a la que avanza más el tiempo tiende a presentar un comportamiento constante, en el caso de la Figura 4.1.2.3., se observa que es a partir del periodo 4s dónde se empieza a estabilizar el rango de desplazamientos (Fajfar 2000).

4.1.3. Estudio Irizarry

El estudio de Irizarry aplica la metodología de análisis de daños provocados por un sismo a partir del proyecto Risk-UE, el cual basa su estudio en los antecedentes históricos registrados. Además, aplica los espectros de demanda según la normativa del Eurocódigo 8, la NCSE-02 y otro estudio realizado por Logomarsiano en 2002. De este modo el estudio hace una comparativa y realiza equivalencias entre los espectros de demanda de dichas normativas (Irizarry 2004).

Así mismo, se establecen los índices de vulnerabilidad de los edificios históricos mediante la zonificación del terreno de Barcelona. Se realiza un análisis dependiendo de la importancia de las actividades que se desarrollan en cada zona, con el objetivo de determinar el daño esperado y el impacto que puede ocasionar en las zonas urbanas, con ello se clasifican las áreas de la ciudad que requieren más atención ante una amenaza sísmica y poder evitar grandes pérdidas (Irizarry 2004).

El espectro de demanda es definido como el 5% del espectro de respuesta de aceleración amortiguada basado en el formato de aceleración-desplazamiento (AD). El formato es expresado en términos de aceleración espectral (S_e) y desplazamiento espectral (S_d). El espectro de demanda representa la

aceleración y desplazamiento espectral que sufre una estructura frente a una acción sísmica. Para llevar a cabo el análisis se realiza la conversión del 5% amortiguado del espectro de respuesta de aceleración en formato aceleración-período (S_a, T) a un espectro de demanda en formato AD (S_a, S_d). Se debe utilizar la siguiente expresión para aplicar la conversión en cuestión (Irizarry 2004):

$$S_d = S_a \left[\frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \right] \quad \text{Ecuación 4.14}$$

A continuación se muestra el espectro de demanda en formato AD (Figura 4.1.3.1.), cada punto en el espectro de demanda representa una aceleración espectral (S_a) y un desplazamiento espectral (S_d) correspondiente a un período de vibración (T). El período se representa a partir de una línea que pasa por el origen de coordenadas, en la cual su pendiente disminuye a medida que aumenta el período (Irizarry 2004).

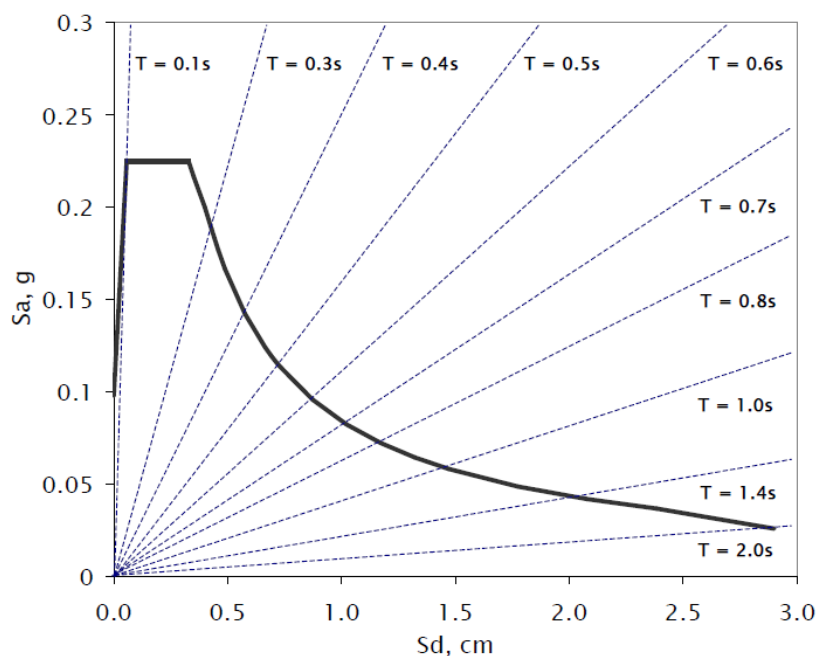


Figura 4.1.3.1. Representación del espectro de demanda en formato AD (Fuente: Irizarry 2004)

En la tesis de Irizarry se realizan unas modificaciones con respecto a las expresiones que definen el espectro de respuesta elástica del Eurocódigo 8. Las modificaciones son las siguientes:

$0 \leq T \leq T_B$:

$$S_a(T) = pga \cdot \left[1 + \frac{T}{T_c} \cdot (B_c - 1) \right] \quad \text{Ecuación 4.15}$$

$T_B \leq T \leq T_C$:

$$S_a(T) = pga \cdot B_C \quad \text{Ecuación 4.16}$$

$T_C \leq T \leq T_D$:

$$S_a(T) = pga \cdot \left[\frac{T_C}{T} \cdot B_C \right] \quad \text{Ecuación 4.17}$$

$T_D \leq T \leq 4s$:

$$S_a(T) = pga \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \cdot B_C \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde:

$S_a(T)$: Espectro de respuesta elástica.

T : Período de vibración del sistema de un solo grado de libertad (SDOF).

pga : Aceleración pico del terreno (representa el parámetro a_{gR} en el Eurocódigo 8).

B_C : Facto definido por $\frac{S_{a\max}}{pga}$

T_B, T_C : Límites de la recta del espectro que define la aceleración constante.

T_D : Inicio del desplazamiento constante en el espectro.

Finalmente, se concluye a partir de los espectros de respuesta de aceleración que la normativa NCSE-02, aplicada en Barcelona, da mayor importancia a los terremotos de mayor intensidad que a los de intensidad moderada (Irizarry 2004).

4.2. Capacidad sísmica

La capacidad sísmica muestra los valores límites con respecto a los movimientos del terreno que puede soportar una estructura, por lo tanto, cada edificio tiene su curva de capacidad. Los datos para graficar la capacidad sísmica se obtienen mediante el programa Tremuri, en el cual se ha introducido el modelo de edificio que se desea estudiar. A partir del programa se consiguen los valores de fuerzas y desplazamientos provocados por un posible terremoto.

La capacidad del edificio se representa mediante la curva de fuerza-desplazamiento que se obtiene de un análisis estático no lineal, es decir, el análisis *pushover* (Fajfar 1999). Este análisis consiste en someter la estructura del edificio a un perfil creciente de fuerzas laterales, es decir, a medida que aumenta la altura del edificio también lo hace la carga horizontal aplicada. De este modo se logra estudiar el comportamiento de los elementos que forman la estructura, su tendencia es ir perdiendo rigidez en el conjunto de la estructura (Fajfar 2000).

Las fuerzas perpendiculares aplicadas y los desplazamientos en el techo del edificio, esto es, los desplazamientos de la parte superior de la estructura, se transforman a aceleraciones y desplazamientos espectrales (Fajfar 1999). El formato de aceleración-desplazamiento (AD) es el escogido para realizar la representación de la capacidad, junto al sistema bilineal equivalente obtenido del análisis *pushover* y los parámetros del análisis modal del método estático no lineal (*Nonlinear Static Procedures*, NSP) (Gonzalez-Drigo et al. 2017). La estructura se simplifica, pasa de ser un sistema de Múltiples Grados de Libertad (MDOF) a convertirse en un sistema de Un Grado de Libertad (SDOF) (Fajfar 1999). Este proceso se logra aplicando el método estático no lineal, conocido como el método N2.

4.2.1. El programa de cálculo: TREMURI

Como se ha indicado anteriormente para realizar el cálculo de la capacidad sísmica en los edificios de mampostería no reforzada se ha empleado el programa Tremuri. El programa parte de la base de aplicar modelos de macro elementos para representar los paneles de mampostería. La aplicación de estos modelos resulta de la observación de casos reales de estructuras las cuales han sido sometidas a acciones sísmicas (Barbat y Pujades 2004). El objetivo de este análisis es describir el comportamiento mecánico no lineal en el plano de los paneles del modelo y determinar las consecuencias de la estructura ante la acción sísmica (Barbat y Aguiar 2003). El modelo considera también la posibilidad de vuelco de la estructura de los macro elementos y los agrietamientos por las fuerzas cortantes aplicadas en el edificio (Barbat y Pujades 2004). El vuelco es representado por el contacto elástico lateral en dos extremos del macro elemento y el agrietamiento por las fuerzas cortantes que se describen mediante la deformación inelástica que considera los efectos de daño y fricción (Barbat y Aguiar 2003). La figura 4.2.1.1. y 4.2.1.2 muestra la distribución de los muros de los dos edificios de estudio con sus oberturas correspondientes.

Los macro elementos son definidos a partir de un seguido de propiedades mecánicas definidas para construcciones de edificios de mampostería. Las propiedades mecánicas en cuestión se consideran representativas de un comportamiento promedio ya que no se puede definir un valor exacto para cada parámetro. Para el ensamblaje de los macro elementos se han utilizado pilares y dinteles, permitiendo así representar los espacios vacíos como las ventanas y las puertas (Barbat y Aguiar 2003). Cada muro del modelo se divide en pilares y dinteles de 2 nodos conectados a áreas rígidas a través de nodos

(Galasco et al. 2004) los cuales se considera que tienen 5 grados de libertad, 3 componentes de desplazamiento y 2 componentes de rotación alrededor de los ejes X e Y (Barbat y Aguiar 2003). En las oberturas pequeñas se supone que la deformación es despreciable ya que se ha observado que en dichas zonas es poco común que aparezcan fisuras (Galasco et al. 2004).

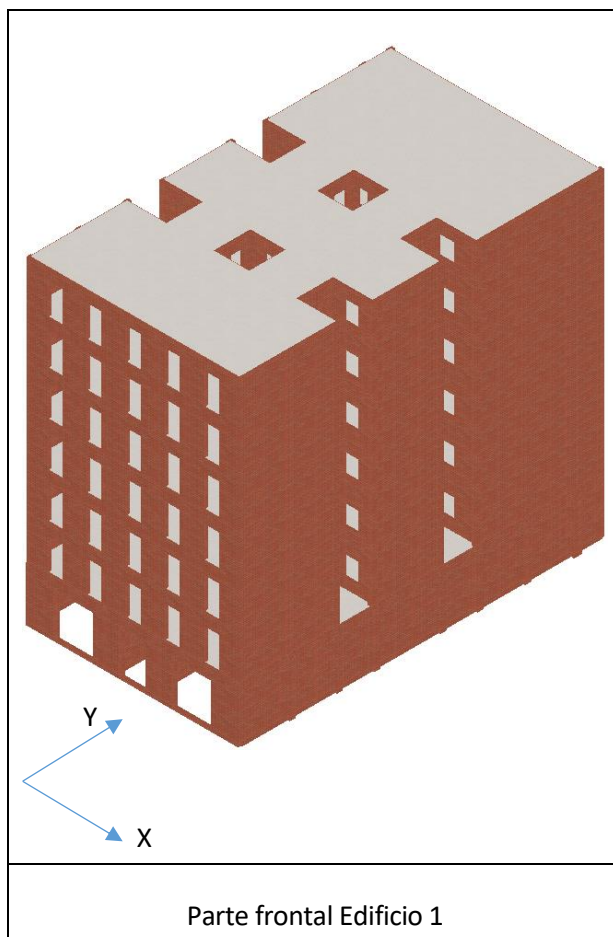


Figura 4.2.1.1. Representación del Edificio 1 mediante Tremuri (Fuente: Propia)

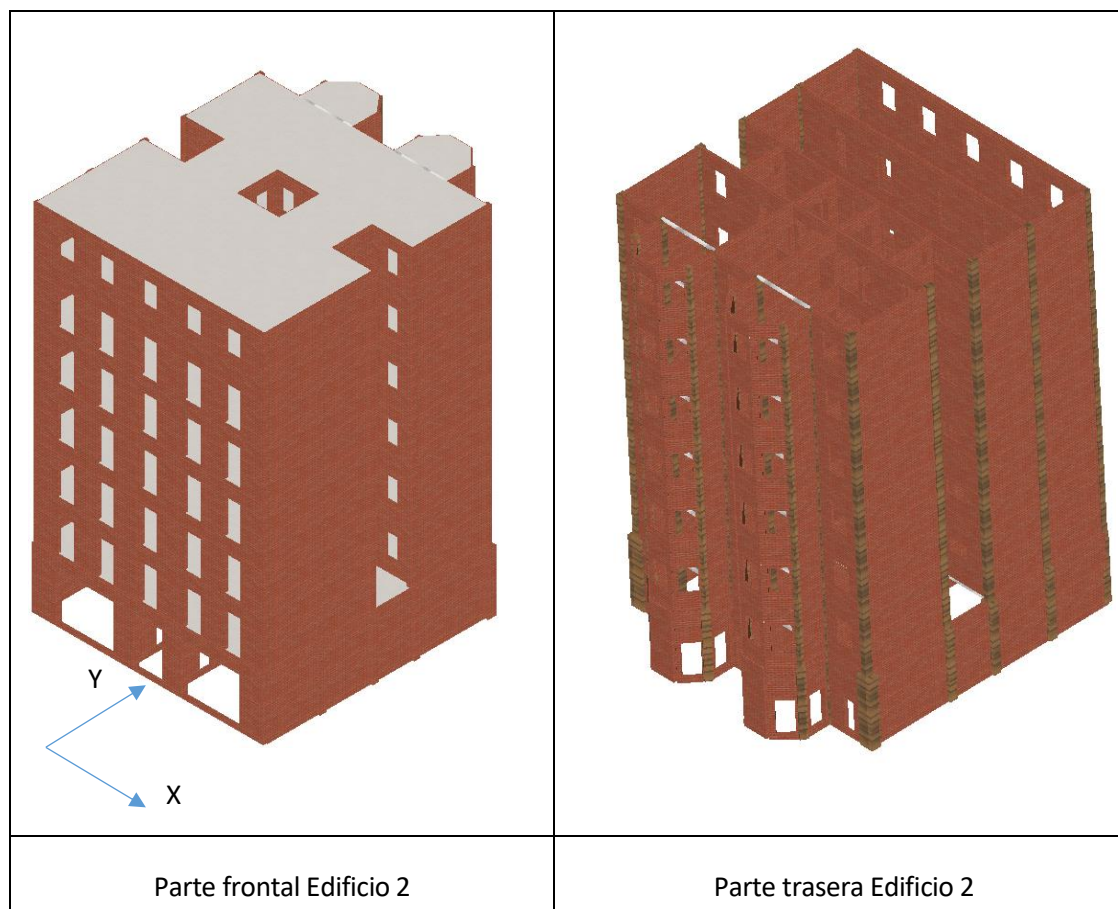


Figura 4.2.1.2. Representación del Edificio 2 mediante Tremuri (Fuente: Propia)

4.3. Método estático no lineal

En este apartado se presentan los métodos estáticos no lineales, el ATC-40 y el método N2. Primeramente, se define el método ATC-40, el cual tiene una gran importancia ya que fue el método precursor del Método estático no lineal (Nonlinear Static Procedures, NSP) y posteriormente se tomó como referencia para la propuesta del método N2. Seguidamente, se explican y definen los pasos que se deben adoptar para aplicar el método N2, el cual es el método escogido para desarrollar el presente trabajo, ya que el ATC-40 es un método que se pensó para edificios de hormigón armado y en el caso de estudio se tiene una estructura de mampostería.

4.3.1. Método ATC-40

El método ATC-40 (Applied Technology Council) se redactó en California en 1996 por la comisión de seguridad ante acciones sísmicas. El texto tiene el objetivo de establecer las bases para el diseño de

edificios de hormigón y proporcionar un análisis de las reacciones estructurales ante el efecto de un sismo (ATC-40 1996).

El método define la capacidad sísmica como la representación de la capacidad para resistir la demanda sísmica. La capacidad general de una estructura depende de la resistencia y la deformación de las componentes individuales de la estructura. Para determinar la capacidad más allá del límite elástico se aplica el método no lineal considerando el análisis *pushover*. Este procedimiento utiliza una serie de análisis elásticos secuenciales, superpuestos para aproximar el diagrama fuerza-desplazamiento de la estructura. De este modo se define la capacidad, a partir de una serie de curvas, se aplica una distribución de fuerzas laterales para obtener componentes adicionales para cada serie de curvas. Este proceso continúa hasta que la estructura se vuelve inestable o hasta alcanzar el límite predeterminado. Finalmente, se construye la curva de capacidad a partir de las diferentes capacidades aplicadas (Figura 4.3.1.1).

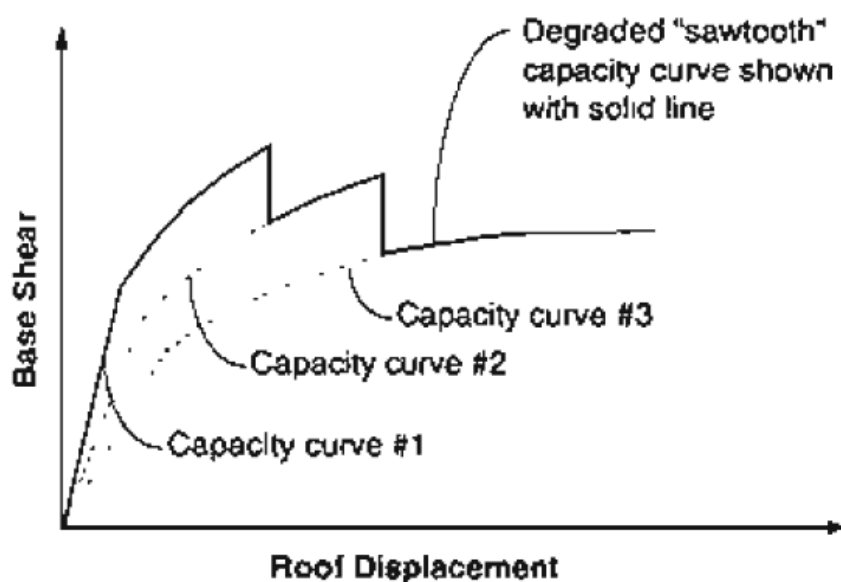


Figura 4.3.1.1. Curva de capacidad de la degradación global del modelo (Fuente: ATC-40 1996)

La demanda sísmica es la representación del movimiento del terreno ante un terremoto. Los movimientos del terreno producen unos patrones de desplazamiento horizontal en la estructura durante el terremoto, dicho movimiento puede variar con el tiempo. Para una estructura y un movimiento del terreno determinados, la demanda de desplazamiento es una estimación de la respuesta máxima esperada durante el movimiento del suelo debido a un determinado movimiento del terreno. La ubicación del punto de desempeño debe satisfacer dos condiciones, el punto debe estar en la curva de capacidad espectral para representar la estructura en un desplazamiento dado y debe estar también en la curva de demanda espectral, reducida un 5% del amortiguamiento con respecto al espectro de diseño.

A partir de las curvas de capacidad y demanda sísmica se debe determinar el punto de desempeño. Dicho punto representa la condición para la cual la capacidad sísmica de la estructura es igual a la demanda sísmica impuesta a la estructura. Para hallar el punto de desempeño se debe realizar la conversión de la curva de capacidad a espectro de capacidad, para definirla en términos de fuerza de corte en la base y desplazamiento del techo. A continuación se muestra gráficamente el proceso descrito (Figura 4.3.1.2.):

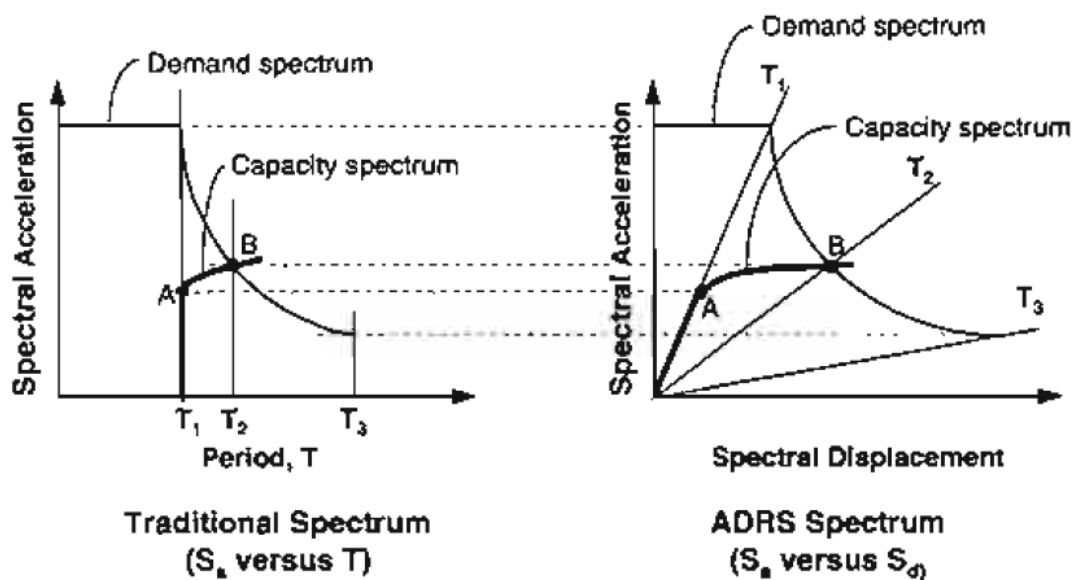


Figura 4.3.1.2. Superposición del espectro de demanda y capacidad (Fuente: ATC-40)

A continuación se lleva a cabo la representación bilineal del espectro de capacidad. Esta representación es necesaria para estimar la amortiguación efectiva y la reducción apropiada de la demanda espectral. La primera línea recta tiene la misma pendiente que la recta que representa el comportamiento inicial elástico del espectro de capacidad. La segunda recta es una estimación del ingeniero para desarrollar el espectro de respuesta de la demanda reducida, se traza una recta para que el área de debajo la representación bilineal sea la misma que la de debajo del espectro de capacidad. Cuando el espectro de respuesta reducido interseca con el espectro de capacidad, se determina el punto de desempeño.

El punto de desempeño se considera adecuado cuando el punto de intersección entre la curva de capacidad y demanda se encuentra en un rango de $\pm 5\%$ de desplazamiento espectral con respecto a la intersección. Si no se cumple dicha condición se debe buscar una nueva segunda recta para la representación del método bilineal, se debe iterar dicho proceso hasta encontrar el punto de desempeño válido.

Para el presente trabajo se aplicará el Método N2 el cual fue desarrollado a partir del ATC-40. Este último método no se utilizará ya que está desarrollado específicamente para estructuras de hormigón

y el análisis que se desea realizar trata sobre edificios de mampostería no reforzada. El método ATC-40 no se utilizará en el trabajo pero se ha considerado necesaria su explicación ya que influyó en la posterior redacción del Método N2.

4.3.2. Método N2

El método N2 fue desarrollado por el profesor Peter Fajfar en la Universidad de Ljubljana. Dicho método al igual que el método ATC-40, es un método estático no lineal (*Nonlinear Static Procedures*, NSP). El primer estudio fue enfocado a edificios de mampostería no-reforzada y posteriormente ha ido evolucionando para tener en cuenta otro tipo de construcciones, como por ejemplo las estructuras asimétricas.

El objetivo del método es el de determinar la rigidez, la resistencia y la ductilidad de una estructura a partir de un análisis *pushover*. (Fajfar y Fischinger 1998). Por este motivo se debe encontrar la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda, con esto se logra una estimación de la aceleración y el desplazamiento de una estructura ante la acción de un sismo (Fajfar 1999).

El método parte de la representación bilineal de la zona elástica y plástica para la curva de capacidad y un espectro de respuesta inelástica para la curva de demanda. Con dicha representación bilineal se logra determinar la aceleración y el desplazamiento correspondientes a la fuerza cortante máxima en la base. Dicho punto se considera el punto final de la capacidad de una estructura. Cabe destacar que el método N2 no considera la posibilidad de que en la zona inelástica ocurra ningún ablandamiento o endurecimiento en la estructura (Gonzalez-Drigo et al. 2017).

A continuación se describen los pasos a seguir para definir el método según el estudio realizado por Peter Fajfar (Fajfar 2000):

1. Datos

Se utiliza un modelo estructural con múltiples grados de libertad (*Multi-Degree-Of-Freedom*, MDOF). Se determina la relación fuerza-deformación del análisis no lineal para los elementos estructurales. Además, se obtienen los datos necesarios para completar los pasos siguientes.

2. Demanda sísmica en formato Aceleración-Desplazamiento (AD)

Se determina el espectro inelástico en formato aceleración-desplazamiento para un sistema de un grado de libertad (*Single-Degree-Of-Freedom*, SDOF) con la siguiente expresión:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde:

S_{de} : Valor del desplazamiento espectral.

S_{ae} : Valor de la aceleración elástica.

Dichos valores corresponden a un periodo (T) y a una relación de amortiguación fija.

El espectro de aceleración elástica típico presenta una amortiguación del 5% normalizado para una aceleración máxima en el terreno, en la Figura 4.3.2.1. se muestra un ejemplo de espectro de demanda aplicando los criterios mencionados.

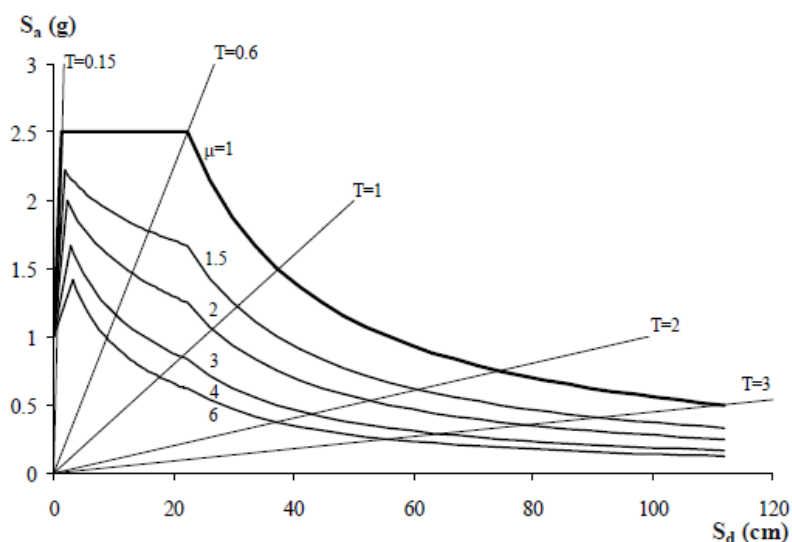


Figura 4.3.2.1. Ejemplo de espectro de demanda en formato AD (Fuente: Fajfar 2000)

3. Análisis *Pushover*

Se realiza un análisis *pushover* que consiste en someter una estructura a un patrón uniforme de fuerzas laterales crecientes, dichas fuerzas representan las fuerzas de inercia que experimentaría la estructura cuando es sometida a los movimientos del terreno provocados por un terremoto. Como consecuencia de este evento la estructura experimenta una pérdida de rigidez. De este modo, aplicando el análisis *pushover* se determina la relación de fuerza-desplazamiento del sistema de múltiples grados de libertad (MDOF). Para representar dicha relación se escoge la fuerza de corte en la base de la estructura para representar la fuerza y el desplazamiento en el techo del edificio para representar el desplazamiento.

4. Sistema con un solo grado de libertad (SDOF) y diagrama de capacidad

La demanda sísmica se determina mediante el uso de espectros de respuesta, el comportamiento inelástico se tiene en cuenta en todo momento. En consecuencia, la estructura debe modelarse como un sistema de un solo grado de libertad (SDOF). El procedimiento gráfico requiere que la rigidez posterior al punto de desempeño sea igual a cero. La influencia del endurecimiento por deformación moderada se incorpora a los espectro de demanda, un endurecimiento por deformación moderada no tienen influencia significativa

en la demanda de desplazamiento y los espectros aplicados son aproximadamente sistemas con un endurecimiento por deformación muy pequeños.

5. Demanda para el sistema de un solo grado de libertad (SDOF) equivalente

La demanda sísmica para el sistema equivalente de un solo grado de libertad se puede determinar aplicando el procedimiento gráfico (Figura 4.3.2.2.). Se grafica en el mismo grafico el espectro de demanda y capacidad, la intersección de la línea radial corresponde al período elástico (T^*) del sistema bilineal. Con respecto la demanda elástica (S_{ae}) que define la demanda de aceleración requerida para el comportamiento elástico y la demanda de desplazamiento correspondiente.

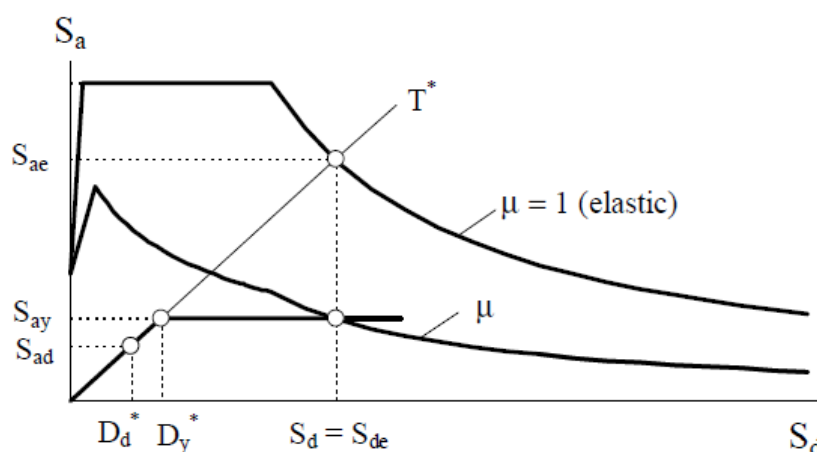


Figura 4.3.2.2. Gráfico de la demanda elástica e inelástica y capacidad (Fuente: Fajfar 2000)

6. Demanda sísmica local y global para el modelo de múltiples grados de libertad (MDOF)

La demanda de desplazamiento (S_d) para el modelo de un solo grado de libertad (SDOF) se transforma en el desplazamiento máximo del sistema con múltiples grados de libertad (MDOF). La demanda sísmica local se puede determinar mediante el análisis *pushover*, sometiendo la estructura bajo cargas laterales crecientes con patrón fijo, la estructura es empujada hasta un desplazamiento superior objetivo. Se supone que la distribución de la deformación a través de la estructura en los análisis estáticos corresponde aproximadamente a la que se obtiene en los análisis dinámicos. El desplazamiento superior objetivo representa un valor medio para la carga del terremoto aplicada y que hay una dispersión considerable sobre la media. Por este motivo, es apropiado someter el edificio a condiciones de carga extrema que exceden los valores de diseño.

7. Evaluación del desempeño, análisis de daños

El desempeño esperado puede evaluarse comparando la demanda sísmica con las capacidades correspondientes. De este modo, se estima la vulnerabilidad del edificio.

A continuación se muestra gráficamente la conversión de la curva de capacidad:

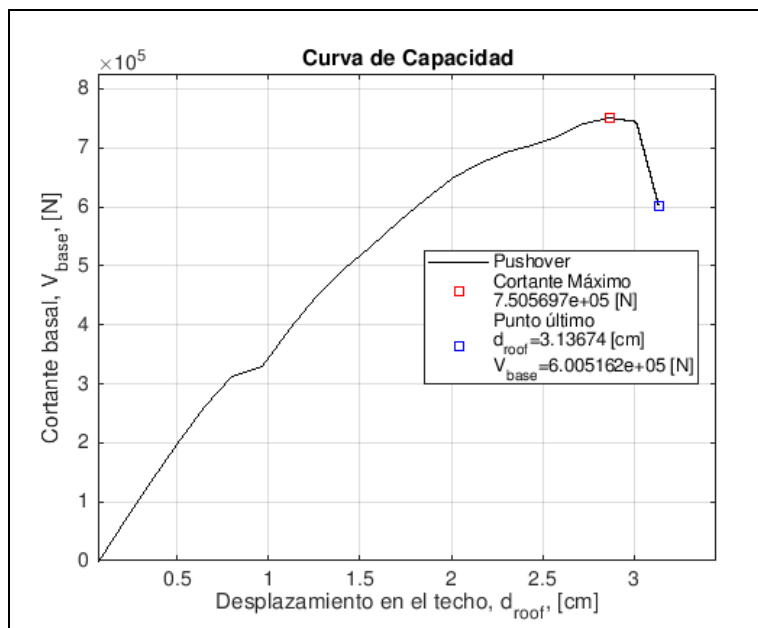


Figura 4.3.2.3. Ejemplo de una Curva de Capacidad resultado del análisis *pushover* (Fuente: Propia)

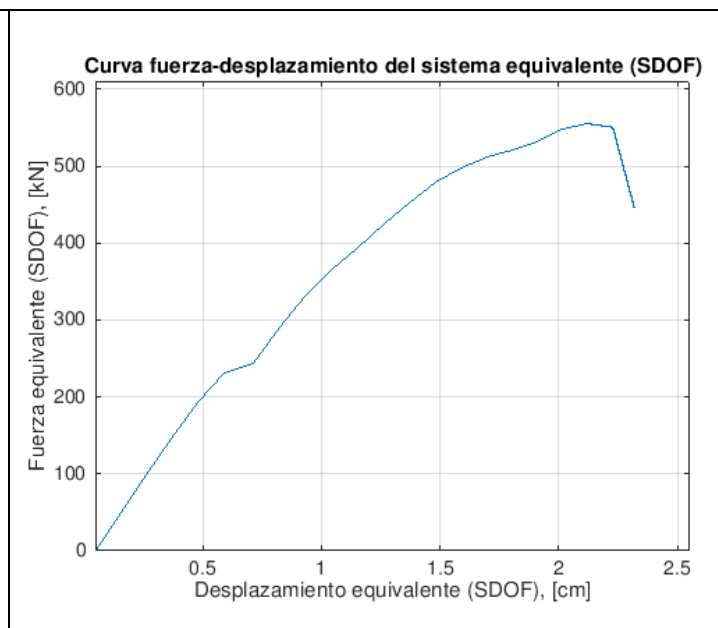


Figura 4.3.2.4. Ejemplo de una Curva fuerza-desplazamiento convertida al sistema equivalente SDOF (Fuente: Propia)

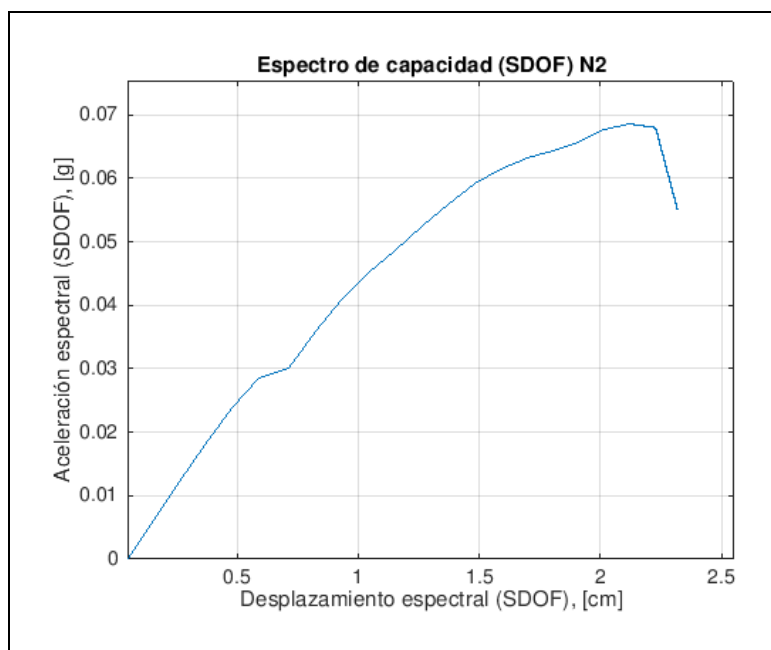


Figura 4.3.2.5. Ejemplo de Espectro de Capacidad aplicando el método N2 (Fuente: Propia)

4.4. Fragilidad

La fragilidad sísmica se representa mediante las curvas de fragilidad, dicho concepto está relacionado con la vulnerabilidad sísmica, de este modo se logra cuantificar los estados de daño de una estructura ante un terremoto (Moreno y Bairán 2010). Para este trabajo, los estados de daño se definen a partir del desplazamiento espectral encontrado a través de la representación bilineal del espectro de capacidad. Para representar las curvas de fragilidad se aplican las formulas propuestas por Lagomarsino y Penna, con el fin de encontrar los intervalos de variación del desplazamiento espectral y definir los cinco estados de daño. El método de cálculo depende del desplazamiento de fluencia (D_y) y el desplazamiento de la capacidad última (D_u). A continuación se definen los rangos para cada estado de daño (Bonett, Barbat, y Pujades 2004):

Estado de daño	Intervalo de S_d
Sin daño	$S_d < 0,7 D_y$
Leve	$0,7 D_y < S_d \leq D_y$
Moderado	$D_y < S_d \leq D_y + 0,25(D_u - D_y)$
Severo	$D_y + 0,25(D_u - D_y) < S_d \leq D_u$
Colapso	$S_d > D_u$

Tabla 4.4.1. Definición de los intervalos de los estados de daño (Fuente: Bonett, Barbat y Pujades 2004)

A partir de los intervalos de los desplazamientos espectrales (S_d) se definen los puntos de partida iniciales de los estados de daño:

Umbral del estado de daño	Desplazamiento espectral (S_d)
Leve	$S_{d1} = 0,7 D_y$
Moderado	$S_{d2} = D_y$
Severo	$S_{d3} = D_y + 0,25(D_u - D_y)$
Completo	$S_{d4} = D_u$

Tabla 4.4.2. Ecuaciones de los umbrales de los estados de daño. (Fuente: Moreno y Bairán 2010)

Los estados de daño se definen de la siguiente manera, evaluado a partir del punto de fluencia, es decir, punto donde la estructura no resiste al sismo (Moreno y Bairán 2010):

- Daño leve: Punto definido antes del de fluencia.
- Daño moderado: Punto justo en el momento de fluencia.
- Daño severo: Punto después del de fluencia.
- Daño completo: Punto que coincide justo con la capacidad última, dicho punto representa el momento en el que la estructura se colapsa.

Una vez encontrados los parámetros presentados anteriormente se representan las curvas de fragilidad. La representación gráfica de la fragilidad parte de la expresión de probabilidad de alcanzar o exceder los diferentes estados de daño. La ecuación de probabilidad sigue una distribución lognormal, así que para cada desplazamiento espectral se define un estado de daño (Bonett, Barbat y Pujades 2004). Una distribución lognormal se define a partir de un valor medio y una desviación estándar (Moreno y Bairán 2010).

$$P \left[ED \geq \frac{ED_i}{S_d} \right] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ED_i}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ED_i}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 4.20}$$

Donde:

S_d : Es el desplazamiento espectral.

S_{d,ED_i} : Representa el valor medio del desplazamiento espectral en el cual el edificio alcanza el umbral ED_i del estado de daño.

β_{ED_i} : Es la desviación estándar del logaritmo natural (ln) correspondiente al desplazamiento espectral para el estado límite de daño, es decir, es la variabilidad asociada al estado de daño.

Φ : Representa la función de distribución normal estándar acumulada.

El subíndice i corresponde al estado de daño dependiendo si es leve, moderado, severo o colapso.

Con este método de trabajo se logra definir la probabilidad de daño para una determinada demanda sísmica (Bonett, Barbat y Pujades 2004).

5. Los edificios

En este trabajo se estudiarán dos edificios situados en la zona del Eixample de Barcelona (Figura 5.1.), los edificios se nombran de la siguiente manera:

- Edificio 1 (ED1)
- Edificio 2 (ED2)



Figura 5.1. Ubicación de los edificios a estudiar (Fuente: Goolzoom)

En la Figura 5.2. se muestra la distribución de los dos edificios indicados mediante su plano 2D correspondiente.

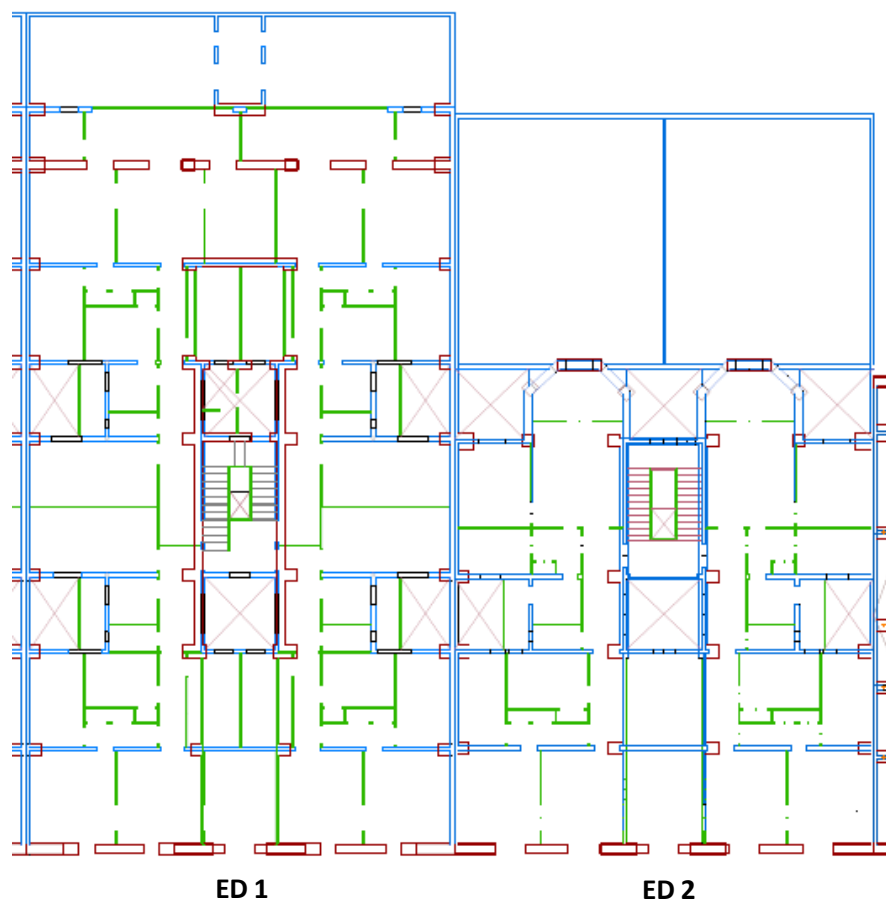


Figura 5.2. Plano de los dos edificios a estudiar (Fuente: Jorge Arturo Ávila Haro)

Se analizan ambos edificios y cómo afectaría el hecho de compartir pared medianera o estar completamente aislados, los edificios en cuestión se localizan de la siguiente forma (Figura 5.3.):

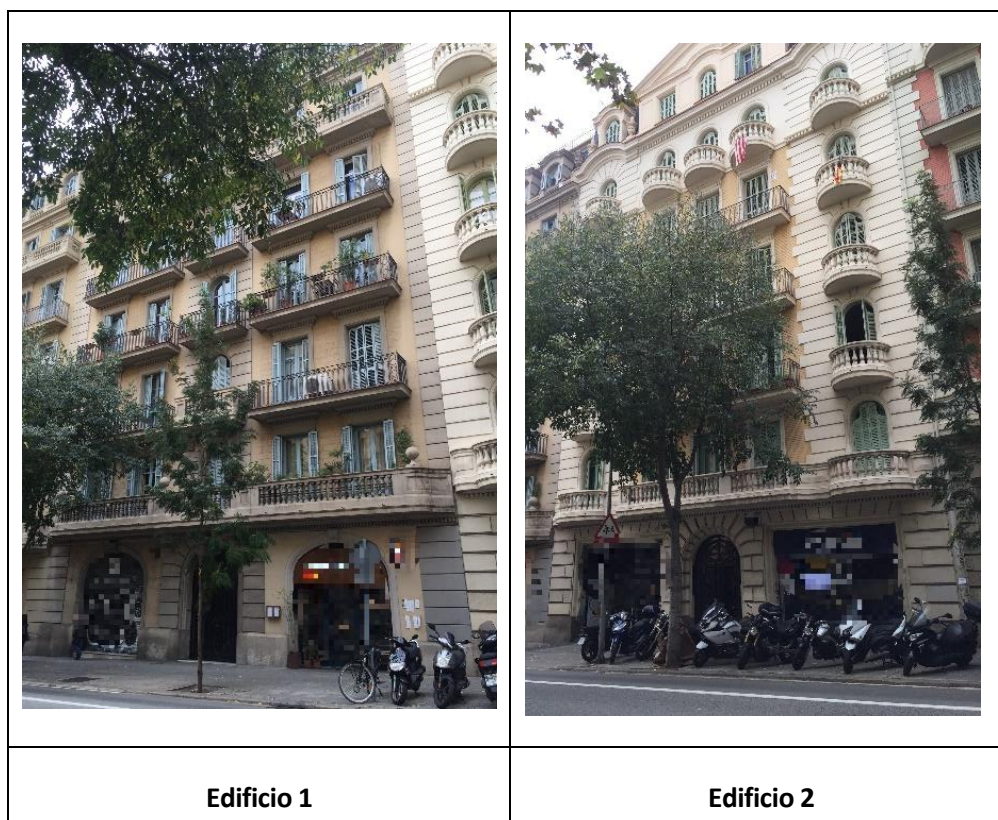


Figura 5.3. Fachadas de los edificios a estudiar (Fuente: Propia)

5.1. Características constructivas de los edificios del Eixample

Los edificios de estudio al ser edificados en el mismo periodo de tiempo tienen las mismas características de construcción. En general la mayoría de edificios del Eixample son similares y cumplen el modelo típico de construcción de dicha zona.

Los edificios seleccionados a estudiar son de mampostería no reforzada, es decir, la unión de los elementos se realiza mediante mortero, comúnmente de cal, y el conjunto de la estructura no es tan rígido como la mampostería reforzada. Normalmente los edificios tienen entre 4 y 7 niveles, en el caso del presente trabajo, los tres edificios son de 7 plantas (Pujades et al. 2012). Los ladrillos en los muros de la fachada típicamente son de 45 a 60cm de espesor en la planta baja y 30cm de espesor en los pisos superiores. Las paredes laterales o intermedias son de 30cm de espesor en la planta baja y 15cm de espesor en el resto de plantas. El núcleo central del edificio tiene un grosor de 30cm para todos los niveles y los muros de carga internos tienen un espesor de 10 a 15cm (Gonzalez-Drigo et al. 2017). Los forjados son de viguetas metálicas y bovedilla cerámica, los cuales en la primera planta se apoyan en vigas metálicas y pilares de fundición (Pujades et al. 2012), este tipo de construcción permite crear espacios más abiertos y amplios y reducir la presencia de muros (Gonzalez-Drigo et al. 2017). Los

niveles superiores son destinados comúnmente para viviendas con una altura inferior que la planta baja y muros de apoyo con aberturas simétricas (Gonzalez-Drigo et al. 2017). En la época de la construcción del Eixample era común las bovedillas cerámicas las cuales son estructuras semicirculares o de forma de bóveda que se ubicaban entre dos vigas con el fin de reducir el peso de los forjados (Figura 5.1.1. y Figura 5.1.2.) (Barbat y Aguiar 2003). Los muros de carga principales están formados por la fachada que da a la parte de la calle, el patio interior y los muros entre edificio (Pujades et al. 2012). El tipo de construcción que se establecía en el Eixample permitía crear amplios espacios abiertos con techos altos, de este modo la planta baja de los edificios se destina a actividades comerciales (Gonzalez-Drigo et al. 2017).

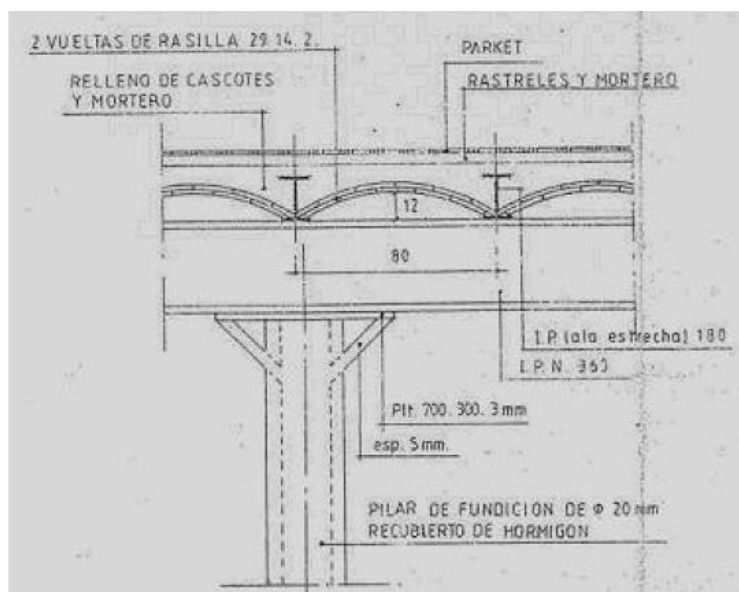


Figura 5.1.1. Ejemplo de forjado de vigueta de madera y bovedilla cerámica en un edificio del Eixample (Fuente: Bonett, Barbat y Pujades 2004)

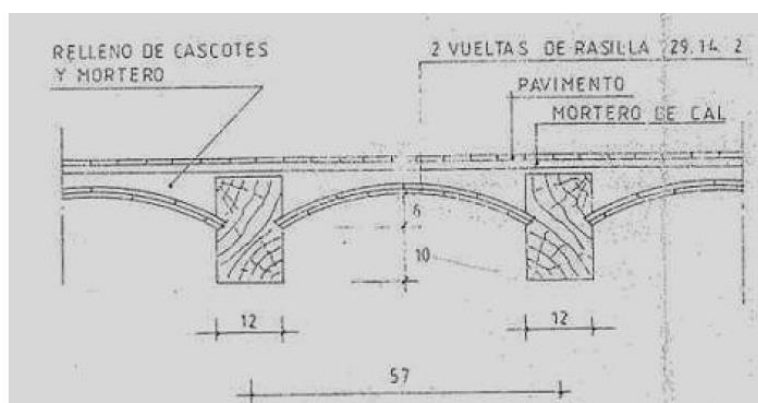


Figura 5.1.2. Ejemplo de forjado de vigueta de madera y bovedilla cerámica en un edificio del Eixample (Fuente: Bonett, Barbat y Pujades 2004)

Por otro lado, aunque los dos edificios tengan el mismo número de plantas, se diferencian en algunas de sus dimensiones. A continuación se muestra una tabla dónde se muestran las diferentes dimensiones de los edificios:

	Edificio 1	Edificio 2
Altura Planta Baja	4m	4m
Altura plantas superiores a la Planta Baja	3,2m	3,2m
Altura Séptima Planta	3,1m	3,1m
Superficie base de la Planta Baja	16mx31m	15,6mx27,7m
Superficie base de Piso Tipo	16mx27,8m	15,6mx19,1m

Tabla 5.1.1. Comparativa entre las dimensiones de los edificios de estudio (Fuente: Propia)

En la Figura 5.1.3. y 5.1.4. se adjunta el plano en 2D de la distribución típica de los edificios del Eixample, en concreto se muestra la planta baja y una planta tipo.

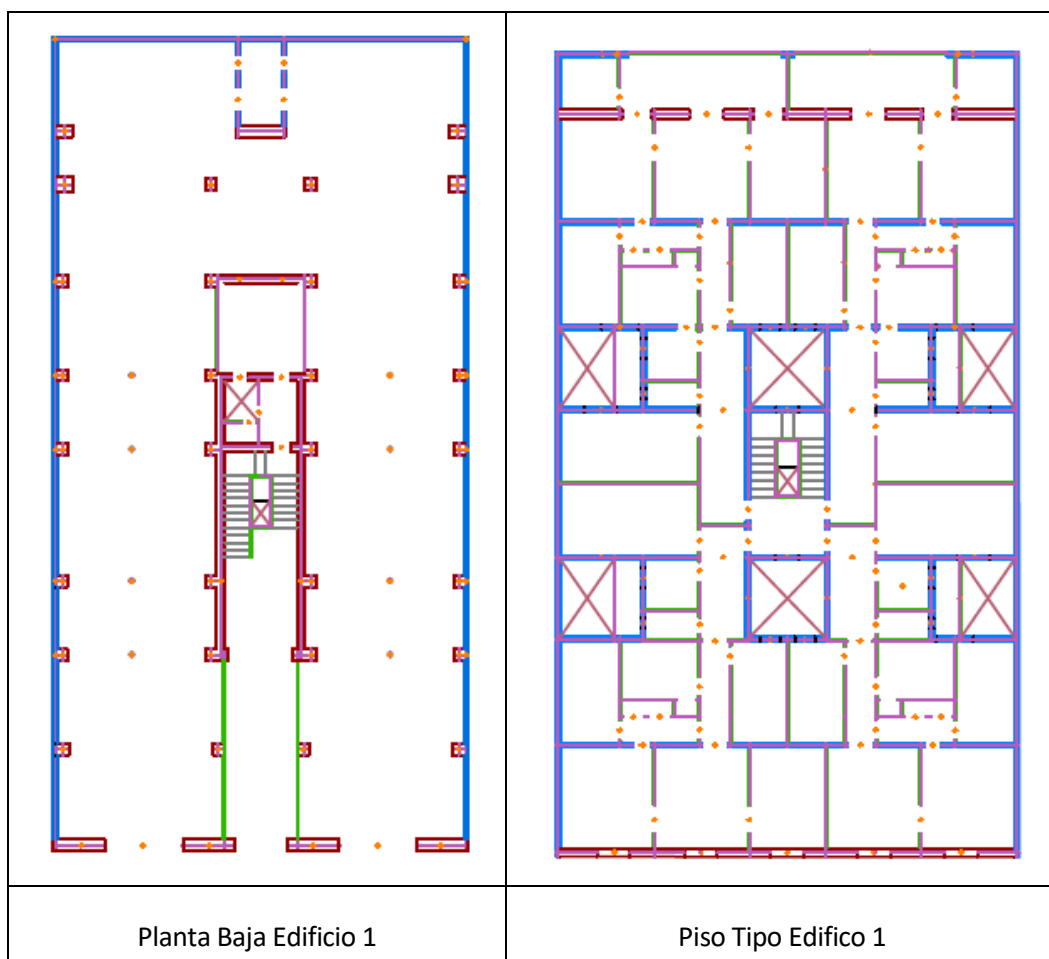


Figura 5.1.3. Distribución de las plantas del Edificio 1 (Fuente: Jorge Arturo Ávila Haro)

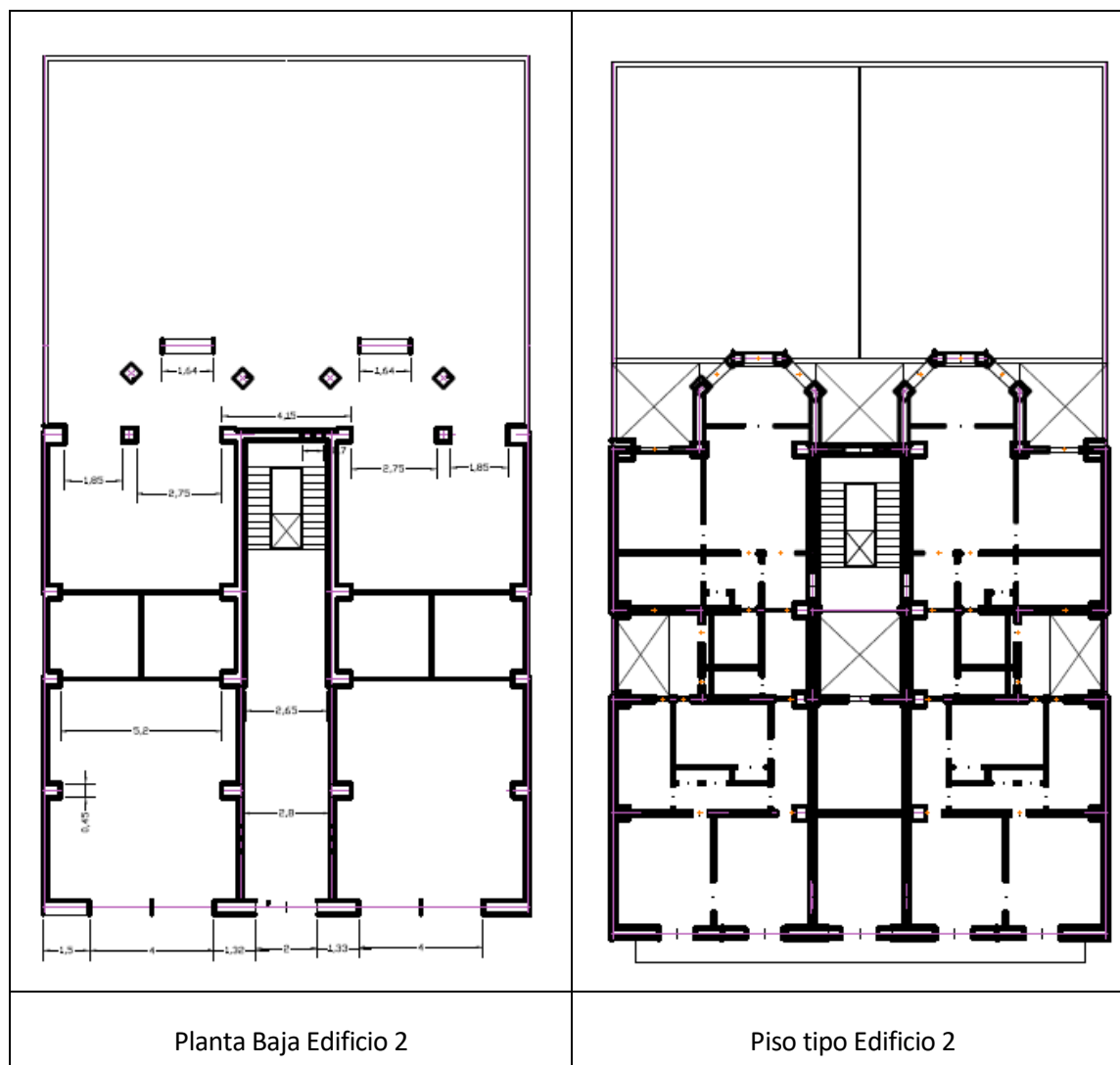


Figura 5.1.4. Distribución de las plantas del Edificio 2 (Fuente: Jorge Arturo Ávila Haro)

5.2. Modelado del edificio

Como ya se ha indicado anteriormente, el modelado tridimensional del edificio se ha hecho mediante el programa Tremuri. Se han introducido, para los dos edificios, las mismas propiedades mecánicas, los valores de dichas propiedades se han considerado un valor promedio para cada comportamiento, ya que no es posible determinar un valor concreto para cada propiedad mecánica. Los valores tomados han sido a partir del artículo *'Non-linear static procedures applied to high-rise residential URM buildings'* (Gonzalez-Drigo et al. 2017) y se presentan en la Tabla 5.2.1.

Propiedad mecánica	Valor promedio
Peso específico (γ)	18kN/m ³
Módulo elástico (E)	2650MPa
Módulo de cortante (G)	590MPa
Resistencia al cortante (τ)	7,95x10 ⁻² MPa
Fuerza a compresión (f_m)	2,65MPa

Tabla 5.2.1. Valores promedio de las propiedades mecánicas (Fuente: Gonzalez-Drigo et al. 2017)

5.2.1. Modelado del Edificio 1

A continuación se muestra el modelo de Edificio 1 elaborado para la simulación con el programa Tremuri, el modelo completo del edificio se ha mostrado en la Figura 4.2.1.1., en este apartado se presentan las partes individuales que forman la estructura del edificio.

- **Planta Baja:** en las siguientes figuras se presenta la distribución de la planta baja, se pueden observar las vigas metálicas que soportan parte de la estructura.

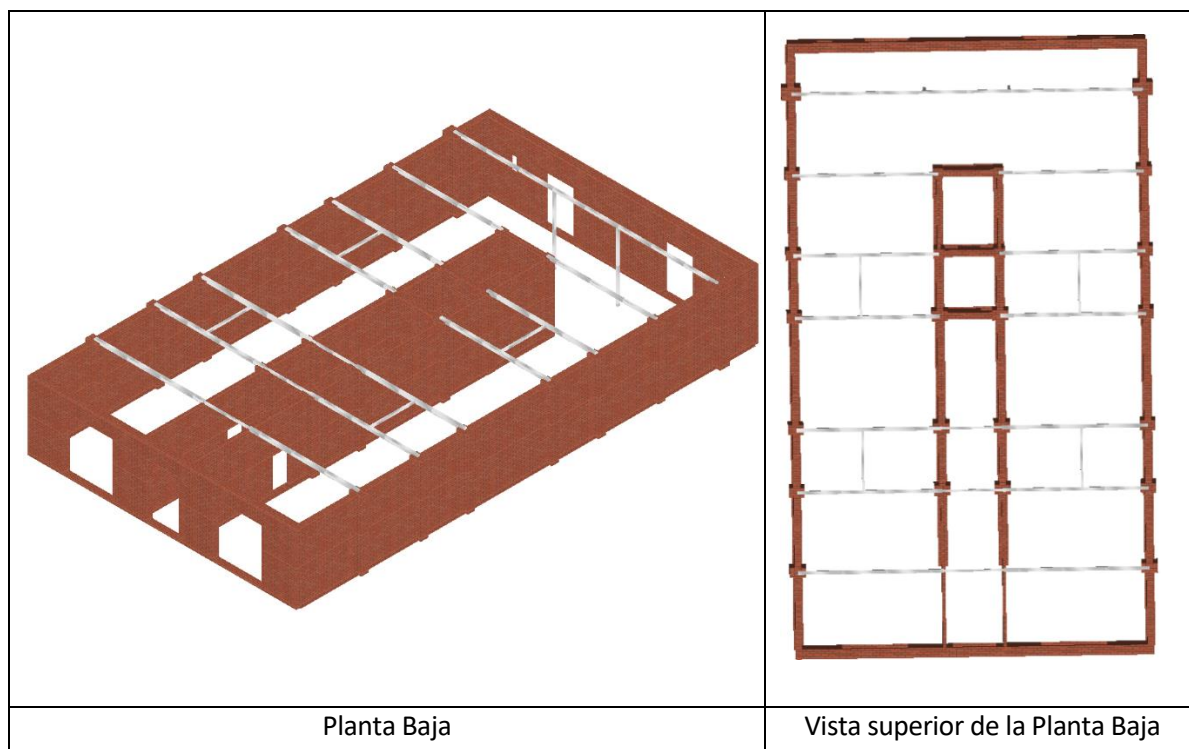


Figura 5.2.1.1. Modelo de Planta Baja (Fuente: Propia)

- **Planta Tipo:** en las siguientes figuras se presenta la distribución de la planta tipo, todos los niveles, exceptuado la planta baja, tienen la misma estructura.

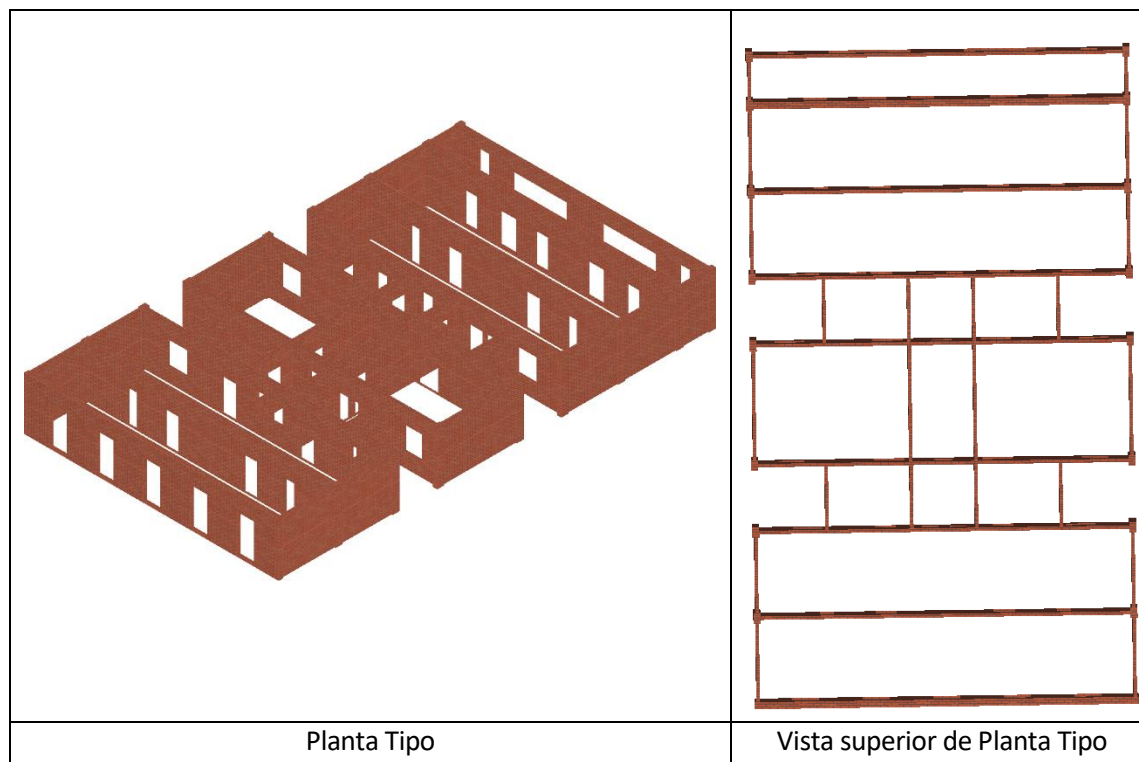


Figura 5.2.1.2. Modelo de Planta Tipo (Fuente: Propia)

- **Medianera:** la siguiente figura muestra la pared que está en contacto con el Edificio 2, cabe destacar que la pared medianera del lado opuesto es completamente simétrica a esta.

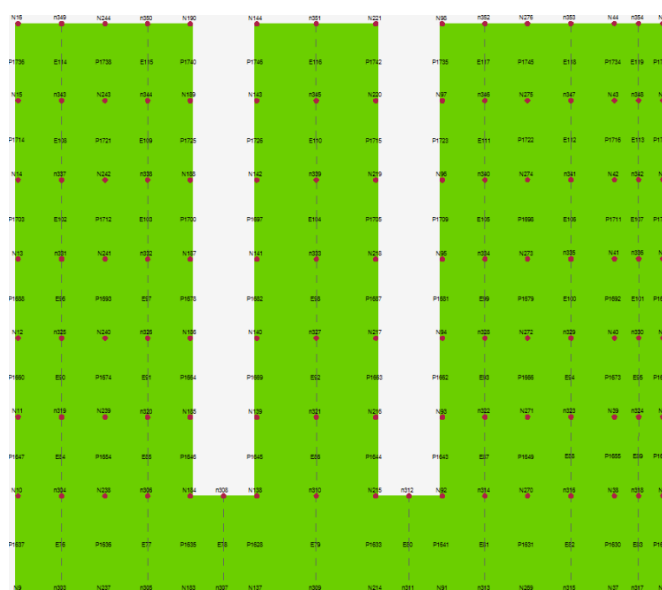


Figura 5.2.1.3. Pared Medianera en contacto con el Edificio 2 (Fuente: Propia)

5.2.2. Modelado del Edificio 2

A continuación se muestra el modelo de Edificio 2 elaborado para la simulación con el programa Tremuri, el modelo completo del edificio se ha mostrado en la Figura 4.2.1.2., en este apartado se presentan las partes individuales que forman la estructura del edificio.

- **Planta Baja:** en las siguientes figuras se presenta la distribución de la planta baja, se pueden observar las vigas metálicas que soportan parte de la estructura.

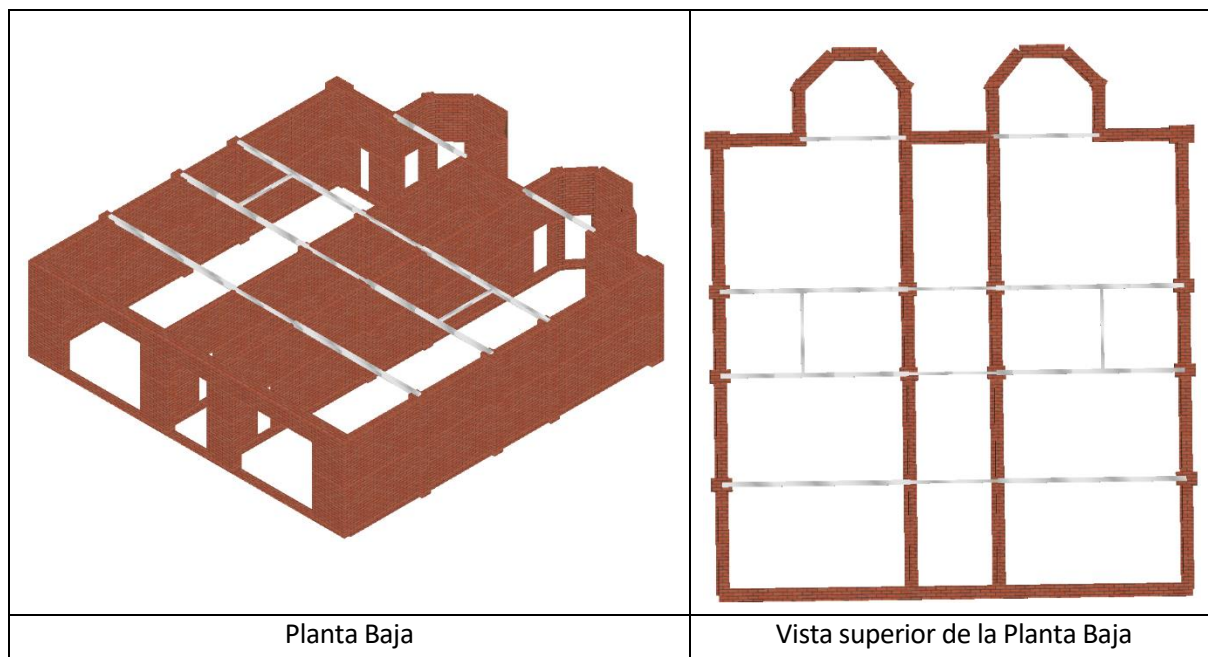


Figura 5.2.2.1. Modelo de Planta Baja (Fuente: Propia)

- **Planta Tipo:** en las siguientes figuras se presenta la distribución de la planta tipo, todos los niveles, exceptuado la planta baja, tienen la misma estructura.

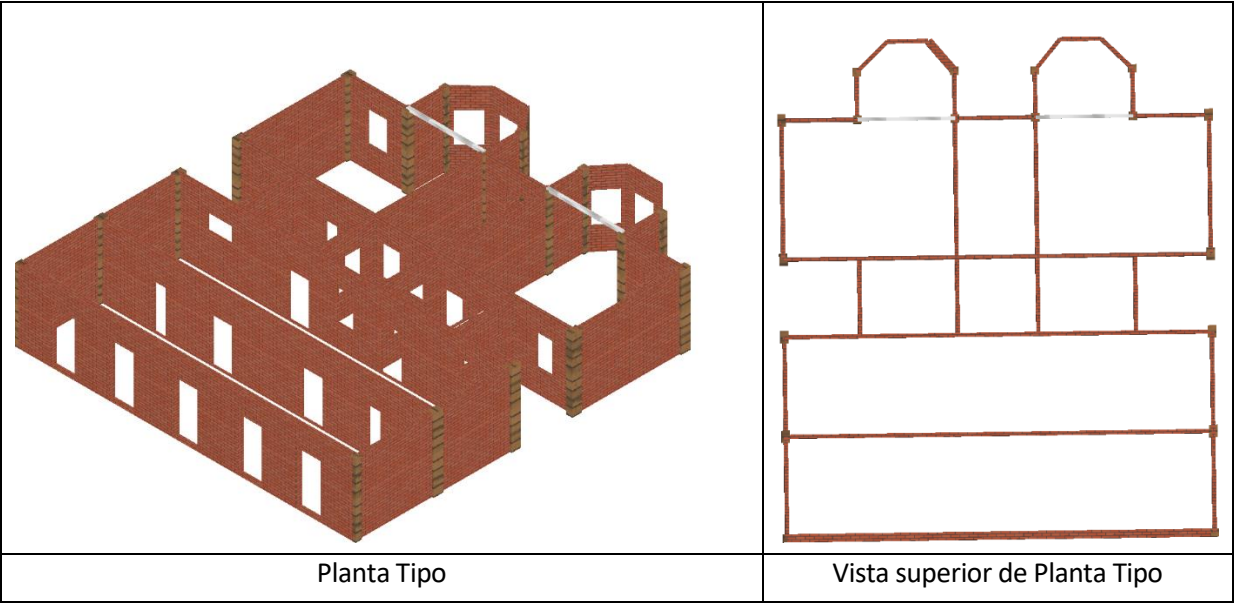


Figura 5.2.2.2. Modelo de Planta Tipo (Fuente: Propia)

- **Medianera:** la siguiente figura muestra la pared que está en contacto con el Edificio 1, cabe destacar que la pared medianera del lado opuesto es completamente simétrica a esta.

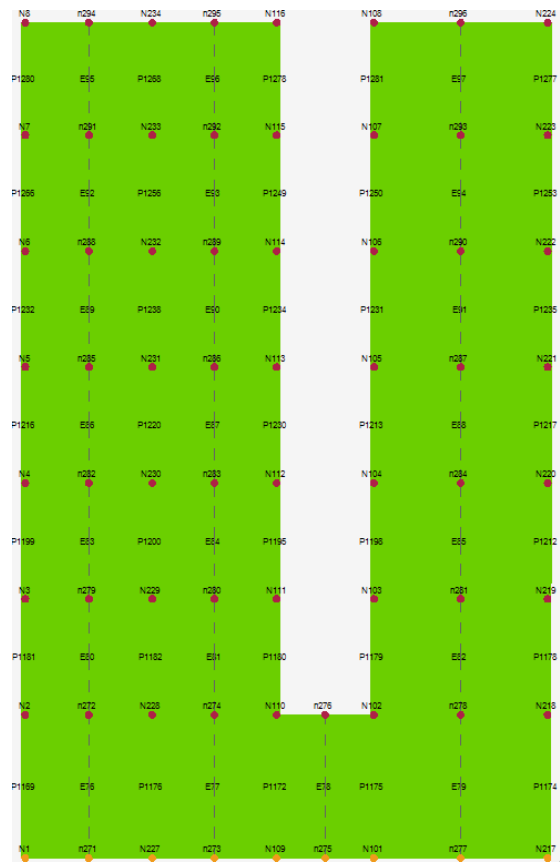


Figura 5.2.2.3. Pared Medianera en contacto con el Edificio 1 (Fuente: Propia)

6. Cálculo y resultados

A continuación se muestran los cálculos y los resultados obtenidos a partir de los valores del análisis *pushover* para el caso del Edificio 1 y el Edificio 2. Se plantea la primera hipótesis de trabajo dónde se muestran los resultados obtenidos en el caso que el Edificio 1 y el Edificio 2 estén completamente aislado. La segunda hipótesis de trabajo planteada es con los dos edificios agregados, es decir, los edificios comparten pared medianera. Los resultados obtenidos se han calculado a través de un código Matlab, dónde se han introducido los valores resultados de la simulación con el programa Tremuri.

6.1. Análisis modal

El análisis modal se ha realizado a partir del programa Tremuri, tanto para el Edificio 1 como para el Edificio 2 de forma individual en la dirección X e Y, así como para el agregado que componen ambos edificios. En este análisis se han obtenido datos de un total de 21 modos, ya que se han considerado 3 modos de vibración por planta, los cuales representan los tres grados de libertad en las tres componentes espaciales (X, Y, Z). Se ha considerado que un modo es significativo si al menos ha movido su masa entre un 1% y un 5%.

6.1.1. Resultados del análisis modal para el Edificio 1

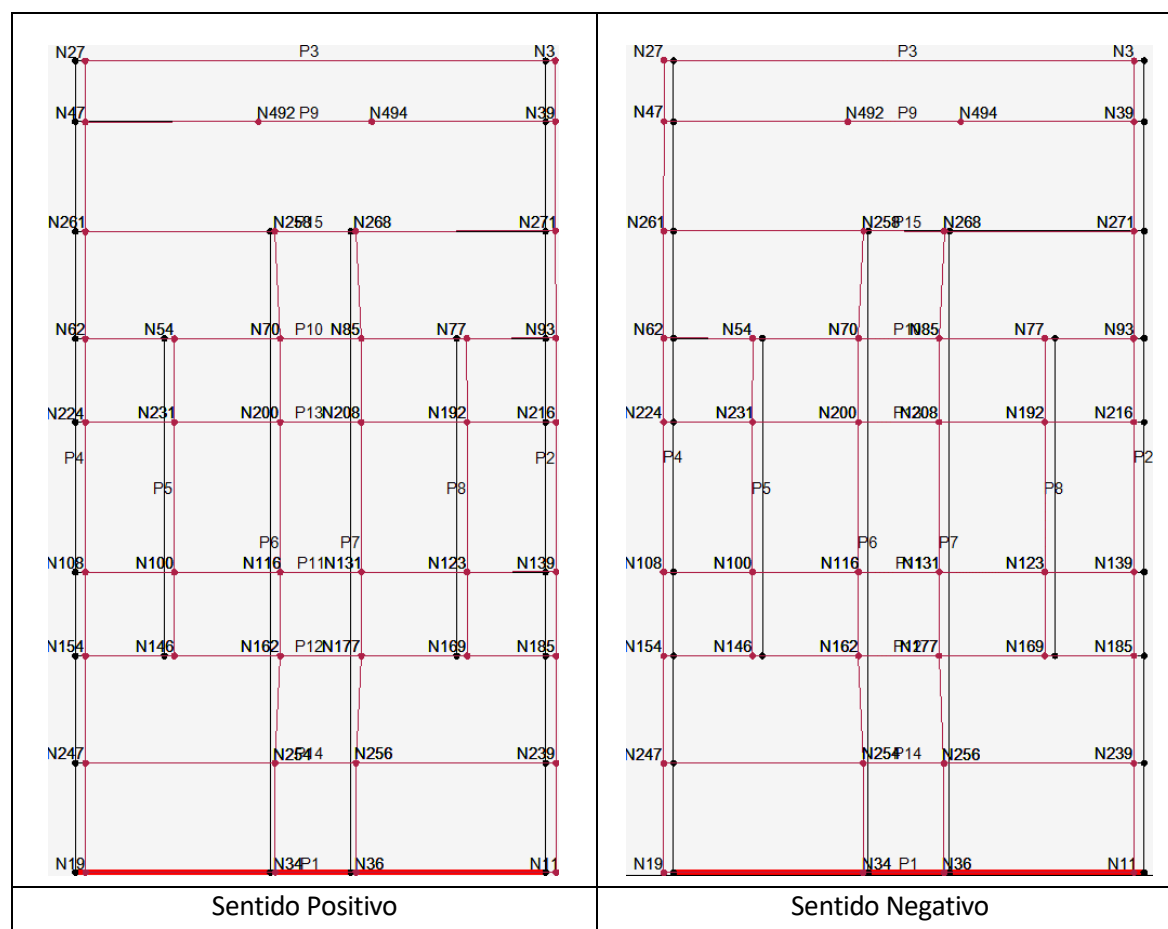
Para la primera hipótesis de trabajo se presentan los tres modos de vibración más significativos, es decir, aquellos que han desplazado un mayor porcentaje de masa.

- Análisis modal en la dirección X:

Modo	Periodo (s)	Masa absoluta desplazada, mx (kg)	Porcentaje de masa relativa desplazada, Mx (%)
1	0,744	2.139.460	84,24
2	0,649	73.898	2,91
3	0,261	250.129	9,85

Tabla 6.1.1.1. Resultados del análisis modal del Edificio 1 en dirección X (Fuente: Propia)

A continuación se presenta la simulación de los desplazamientos modales en la séptima planta para la dirección X obtenidos a través del programa Tremuri.



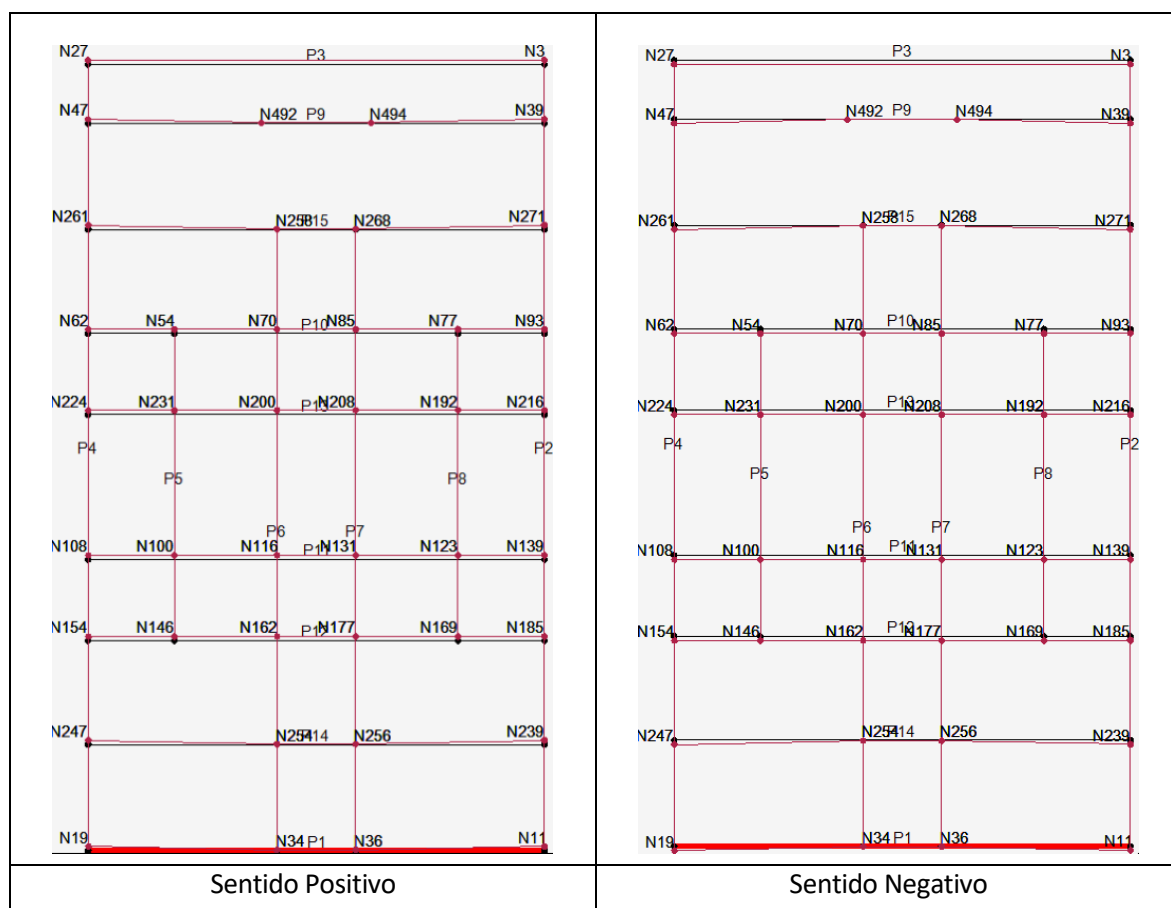


Figura 6.1.1.2. Desplazamiento modal del Edificio 1 en el Nivel 7 en la dirección Y (Fuente: Propia)

6.1.2. Resultados del análisis modal para el Edificio 2

Siguiendo el mismo criterio que en el análisis modal para el Edificio 1, se presentan los tres modos de vibración más significativos para el Edificio 2.

- Análisis modal en la dirección X:

Modo	Periodo (s)	Masa absoluta desplazada, mx (kg)	Porcentaje de masa relativa desplazada, Mx (%)
1	0,871	1.060.500	68,22
2	0,689	309.609	19,92
3	0,300	126.475	8,14

Tabla 6.1.2.1. Resultados del análisis modal del Edificio 2 en dirección X (Fuente: Propia)

A continuación se presenta la simulación de los desplazamientos modales en la séptima planta para la dirección X obtenidos a través del programa Tremuri.

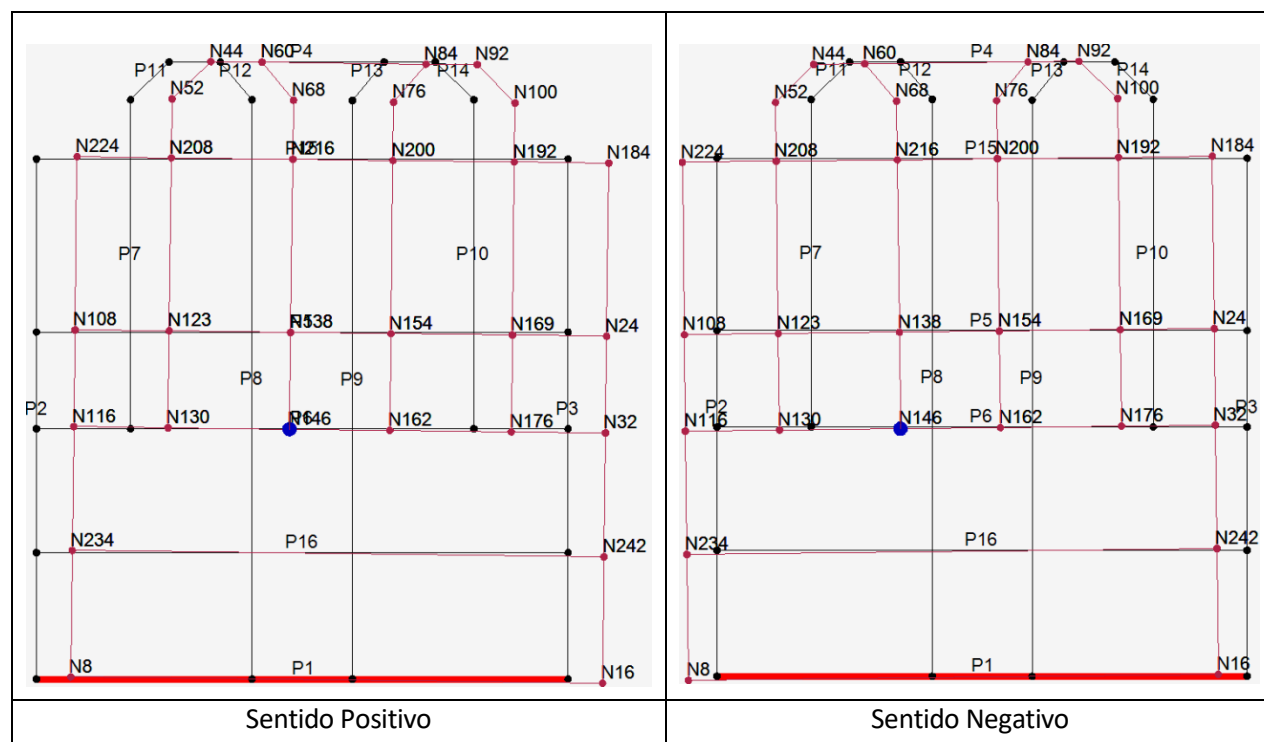


Figura 6.1.2.1. Desplazamiento modal del Edificio 2 en el Nivel 7 en la dirección X (Fuente: Propia)

- **Análisis modal en la dirección Y:**

Modo	Periodo (s)	Masa absoluta desplazada, my (kg)	Porcentaje de masa relativa desplazada, My (%)
1	0,736	1.144.420	73,61
2	0,245	229.428	14,76
3	0,142	76.418	4,92

Tabla 6.1.2.2. Resultados del análisis modal del Edificio 2 en dirección Y (Fuente: Propia)

A continuación se presenta la simulación de los desplazamientos modales en la séptima planta para la dirección Y obtenidos a través del programa Tremuri.

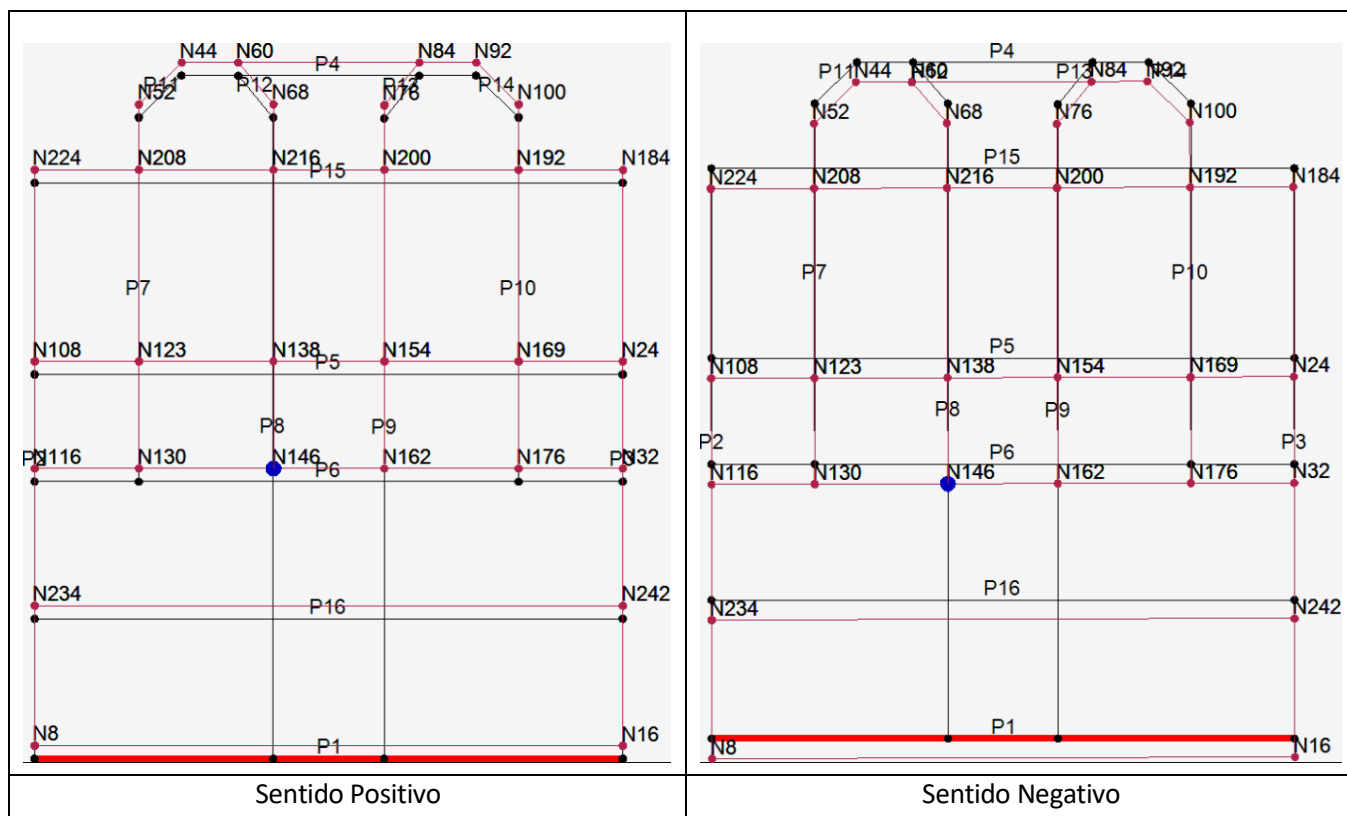


Figura 6.1.2.2. Desplazamiento modal del Edificio 2 en el Nivel 7 en la dirección Y (Fuente: Propia)

6.1.3. Resultados del análisis modal para el Agregado

Siguiendo el mismo criterio que en el análisis modal para el Edificio 1 y el Edificio 2, se presentan los tres modos de vibración más significativos cuando ambos edificios están agregados.

- Análisis modal en la dirección X:

Modo	Periodo (s)	Masa absoluta desplazada, mx (kg)	Porcentaje de masa relativa desplazada, Mx (%)
1	0,757	3.654.070	87,67
2	0,739	50.456	1,21
3	0,258	348.890	8,37

Tabla 6.1.3.1. Resultados del análisis modal del Agregado en dirección X (Fuente: Propia)

- **Análisis modal en la dirección Y:**

Modo	Periodo (s)	Masa absoluta desplazada, m_y (kg)	Porcentaje de masa relativa desplazada, M_y (%)
1	0,739	2.984.202	71,6
2	0,654	141.120	3,39
3	0,248	602.781	14,46

Tabla 6.1.3.2. Resultados del análisis modal del Agregado en dirección Y (Fuente: Propia)

6.2. Análisis estático no lineal

Como se ha definido en el apartado de Metodología, la normativa NCSE-02 estipula los criterios para aquellas construcciones que obligatoriamente deben cumplirla y aquellas que no tienen obligación de aplicarla. En el siguiente análisis se aplican diferentes aceleraciones pico del terreno (p_g), para observar si es adecuado lo que marca la Norma,

Se obtiene la representación bilineal del sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF) para realizar el análisis estático no lineal. Se define la curva de capacidad dónde se encuentra el cortante máximo y el punto último que corresponde a una degradación del 20% respecto al punto máximo, en otras palabras, es el 80% del cortante máximo. Dicho criterio se aplica en todos los casos de estudio.

Para las dos hipótesis que se plantean en el trabajo se realizarán los siguientes análisis:

- Dirección en el eje X sentido Positivo
- Dirección en el eje X sentido Negativo
- Dirección en el eje Y sentido Positivo
- Dirección en el eje Y sentido Negativo

6.2.1. Primera hipótesis: Edificio 1

Se presenta el análisis en el eje X en sentido positivo para el Edificio 1 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 2.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 1 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

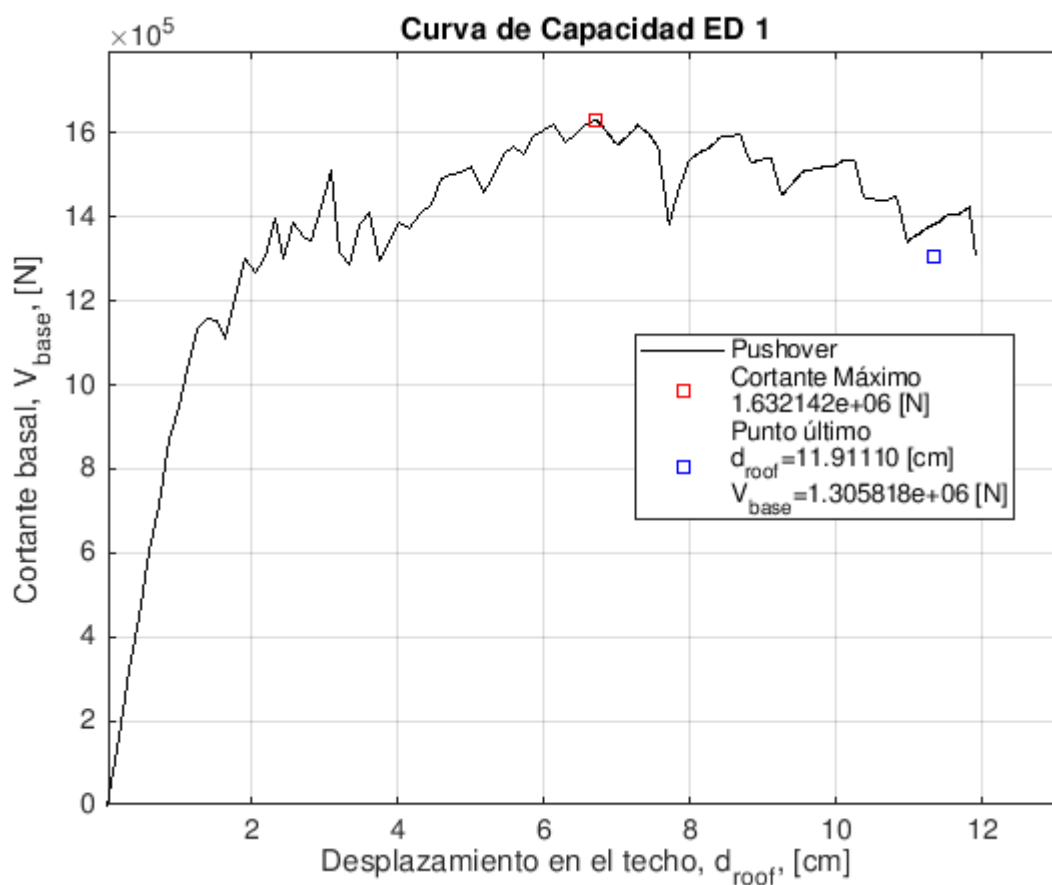


Figura 6.2.1.1. Curva de capacidad del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

A partir de la Figura 6.2.1.1. se extraen los siguientes resultados:

	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
Eje X Positivo ED1	$1,632 \times 10^3$	$1,306 \times 10^3$	11,91

Tabla 6.2.1.1. Resultados curva de capacidad del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

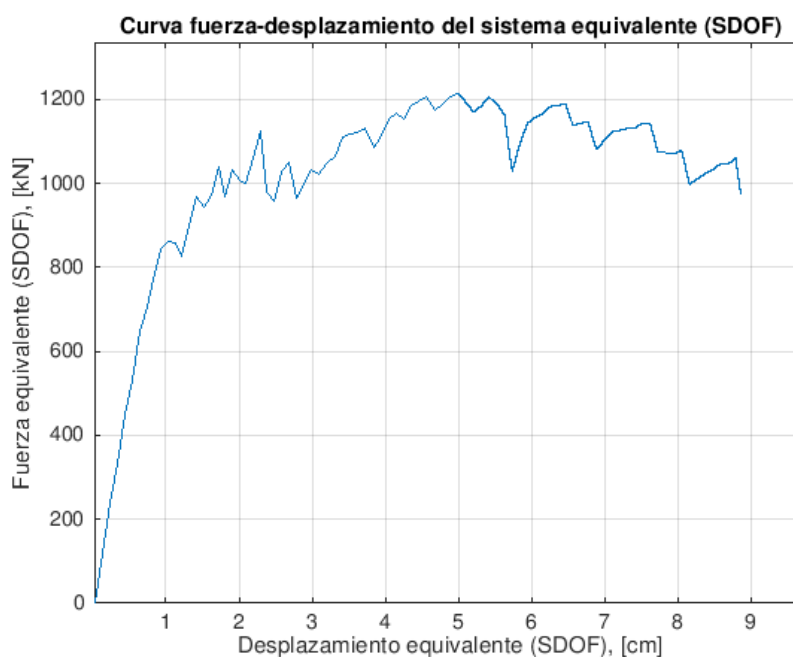


Figura 6.2.1.2. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

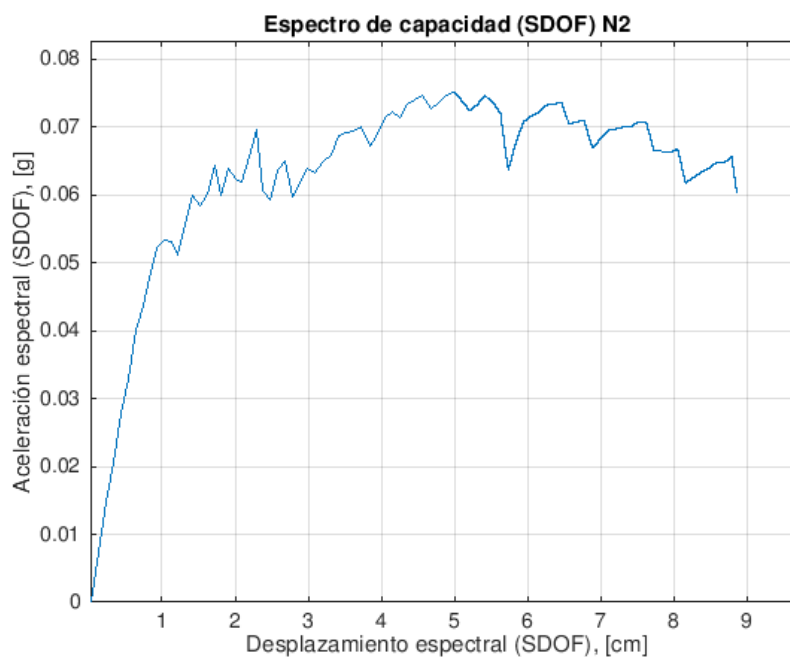


Figura 6.2.1.3. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

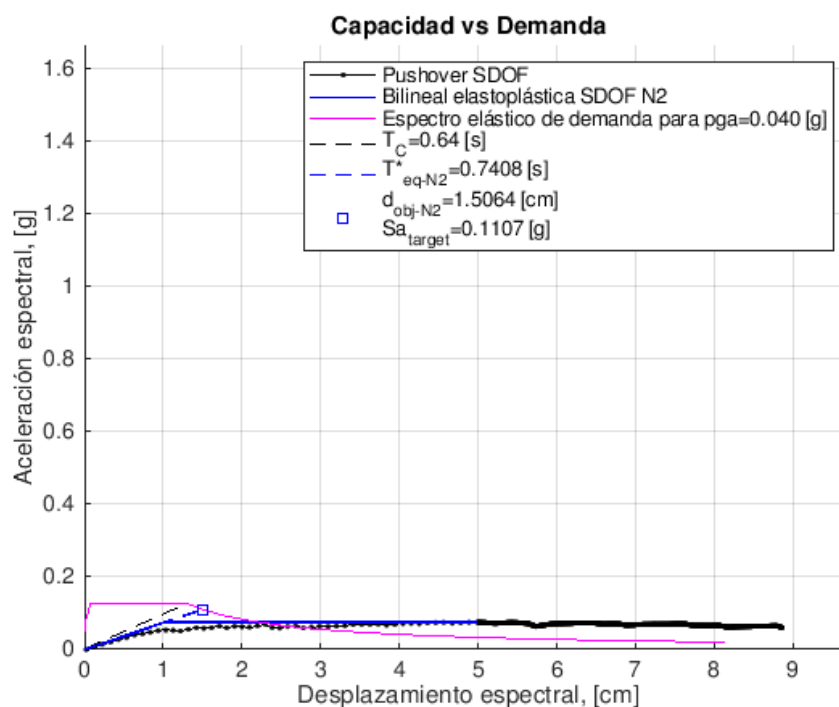


Figura 6.2.1.4. Capacidad frente a demanda con pga=0,04g del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se obtiene en el punto de desempeño un desplazamiento espectral de 1,506cm.

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

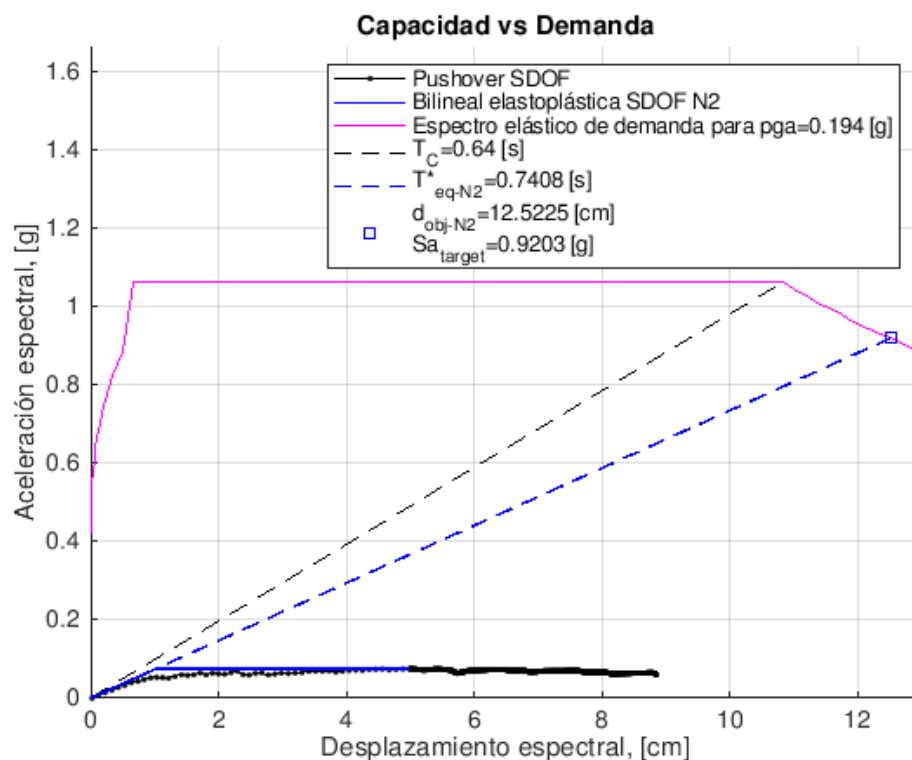


Figura 6.2.1.5. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se obtiene que en el punto de desempeño un desplazamiento espectral de 12,522cm.

Se realiza la misma metodología para la dirección X negativa e Y positiva y negativa, a continuación se resumen los resultados obtenidos:

- **Resultados de la curva de capacidad (cortante máximo y punto último):**

	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
Eje X Negativo ED1	$1,692 \times 10^3$	$1,354 \times 10^3$	11,62
Eje Y Positivo ED1	$2,719 \times 10^3$	$2,176 \times 10^3$	5,857
Eje Y Negativo ED1	$2,879 \times 10^3$	$2,304 \times 10^3$	6,187

Tabla 6.2.1.2. Resultados obtenidos en las curvas de capacidad para el Edificio 1 (Fuente: Propia)

- **Resultados de enfrentar la capacidad y la demanda para una aceleración pico de 0,04g:**

	Punto de desempeño	
	Desplazamiento Espectral (cm)	Aceleración Espectral (g)
Eje X Negativo ED1	1,466	0,114
Eje Y Positivo ED1	1,425	0,117
Eje Y Negativo ED1	1,466	0,114

Tabla 6.2.1.3. Resultados capacidad frente demanda para el Edificio 1 con $p_{ga}=0,04g$
(Fuente: Propia)

- **Resultados de enfrentar la capacidad y la demanda para una aceleración pico de 0,194g:**

	Punto de desempeño	
	Desplazamiento Espectral (cm)	Aceleración Espectral (g)
Eje X Negativo ED1	12,184	0,946
Eje Y Positivo ED1	11,845	0,973
Eje Y Negativo ED1	12,184	0,946

Tabla 6.2.1.4. Resultados capacidad frente demanda para el Edificio 1 con $p_{ga}=0,194g$
(Fuente: Propia)

La representación gráfica de dichos resultados, para la dirección X negativa e Y positiva y negativa, se adjunta en el Anexo A1.

6.2.2. Primera hipótesis: Edificio 2

Se presenta el análisis en el eje X en sentido positivo para el Edificio 2 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 1.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 2 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

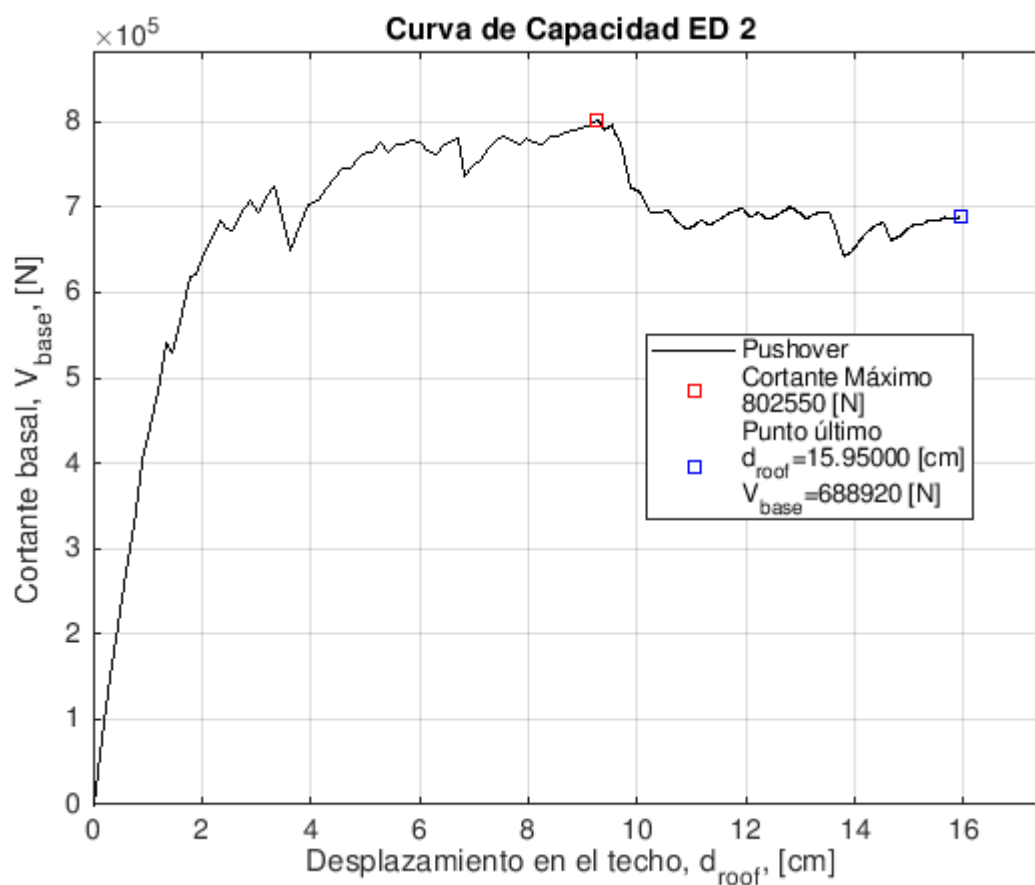


Figura 6.2.2.1. Curva de capacidad del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

A partir de la Figura 6.2.2.1. se extraen los siguientes resultados:

	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
Eje X Positivo ED2	802,550	688,920	15,95

Tabla 6.2.2.1. Resultados curva de capacidad del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

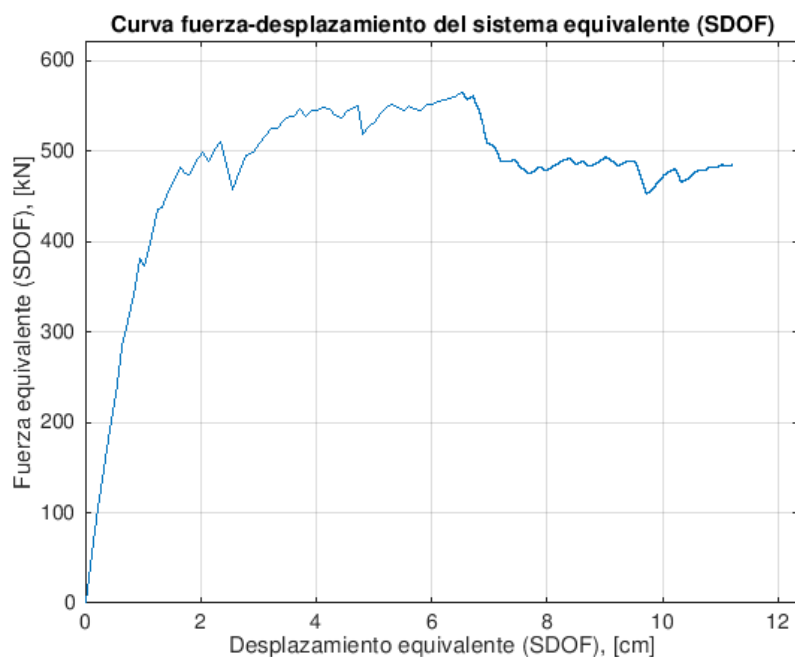


Figura 6.2.2.2. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

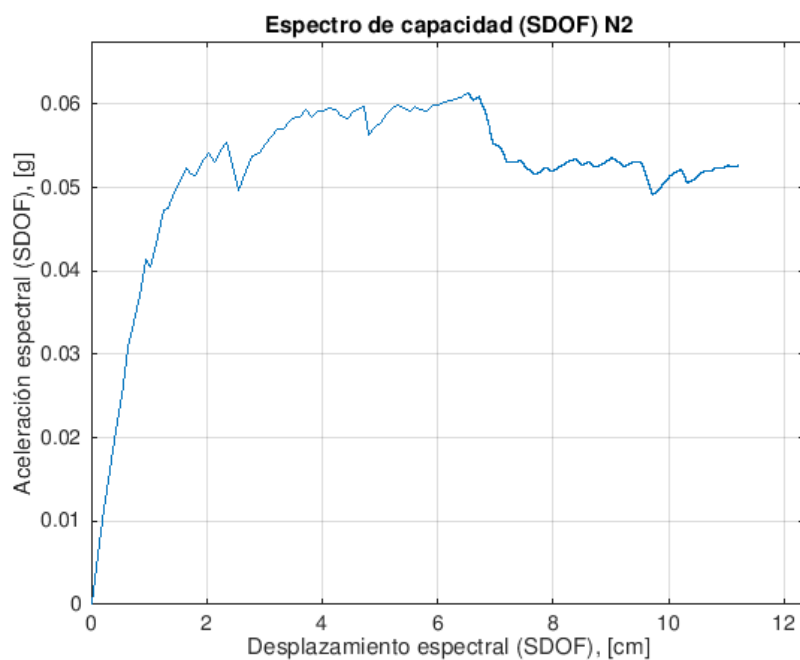


Figura 6.2.2.3. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

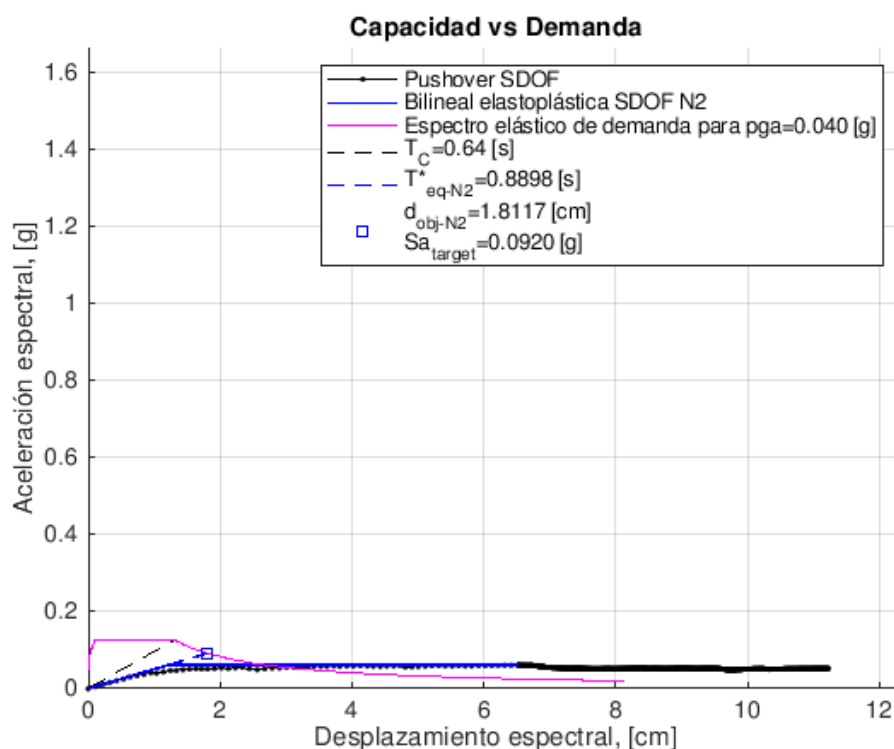


Figura 6.2.2.4. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se obtiene en el punto de desempeño un desplazamiento espectral de 1,812cm.

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

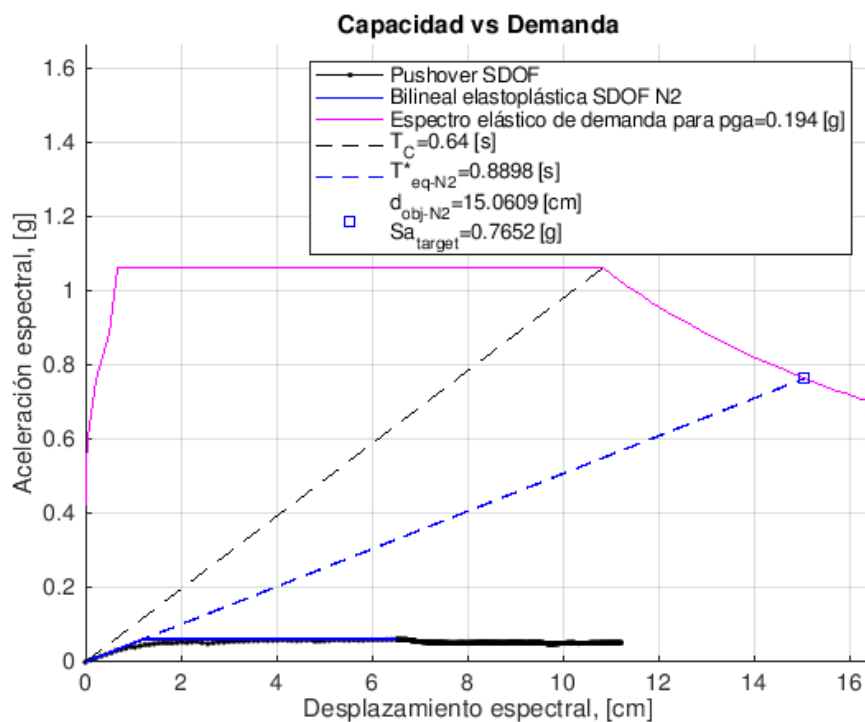


Figura 6.2.2.5. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se obtiene que en el punto de desempeño un desplazamiento espectral de 15,061cm.

Se realiza la misma metodología para la dirección X negativa e Y positiva y negativa, a continuación se resumen los resultados obtenidos:

- **Resultados de la curva de capacidad (cortante máximo y punto último):**

	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
Eje X Negativo ED2	$8,33 \times 10^2$	698,550	13,70
Eje Y Positivo ED2	1.576,310	1.544,730	5,080
Eje Y Negativo ED2	1.717,120	1.426,460	7,010

Tabla 6.2.2.2. Resultados obtenidos en las curvas de capacidad para el Edificio 2 (Fuente: Propia)

- **Resultados de enfrentar la capacidad y la demanda para una aceleración pico de 0,04g:**

	Punto de desempeño	
	Desplazamiento Espectral (cm)	Aceleración Espectral (g)
Eje X Negativo ED2	1,730	0,0964
Eje Y Positivo ED2	1,425	0,117
Eje Y Negativo ED2	1,384	0,120

Tabla 6.2.2.3. Resultados capacidad frente demanda para el Edificio 2 con $p_{ga}=0,04g$
(Fuente: Propia)

- **Resultados de enfrentar la capacidad y la demanda para una aceleración pico de 0,194g:**

	Punto de desempeño	
	Desplazamiento Espectral (cm)	Aceleración Espectral (g)
Eje X Negativo ED2	14,384	0,801
Eje Y Positivo ED2	11,845	0,973
Eje Y Negativo ED2	11,507	1,002

Tabla 6.2.2.4. Resultados capacidad frente demanda para el Edificio 2 con $p_{ga}=0,194g$
(Fuente: Propia)

La representación gráfica de dichos resultados, para la dirección X negativa e Y positiva y negativa, se adjunta en el Anexo A2.

6.2.3. Segunda hipótesis: Edificios Agregados

Se presenta el análisis en el eje X en sentido positivo para el Edificio 1 y el Edificio 2 compartiendo pared medianera, es decir, cuando los dos edificios están agregados.

Se obtiene la curva de capacidad para el agregado de edificios a partir de la simulación con el programa Tremuri.

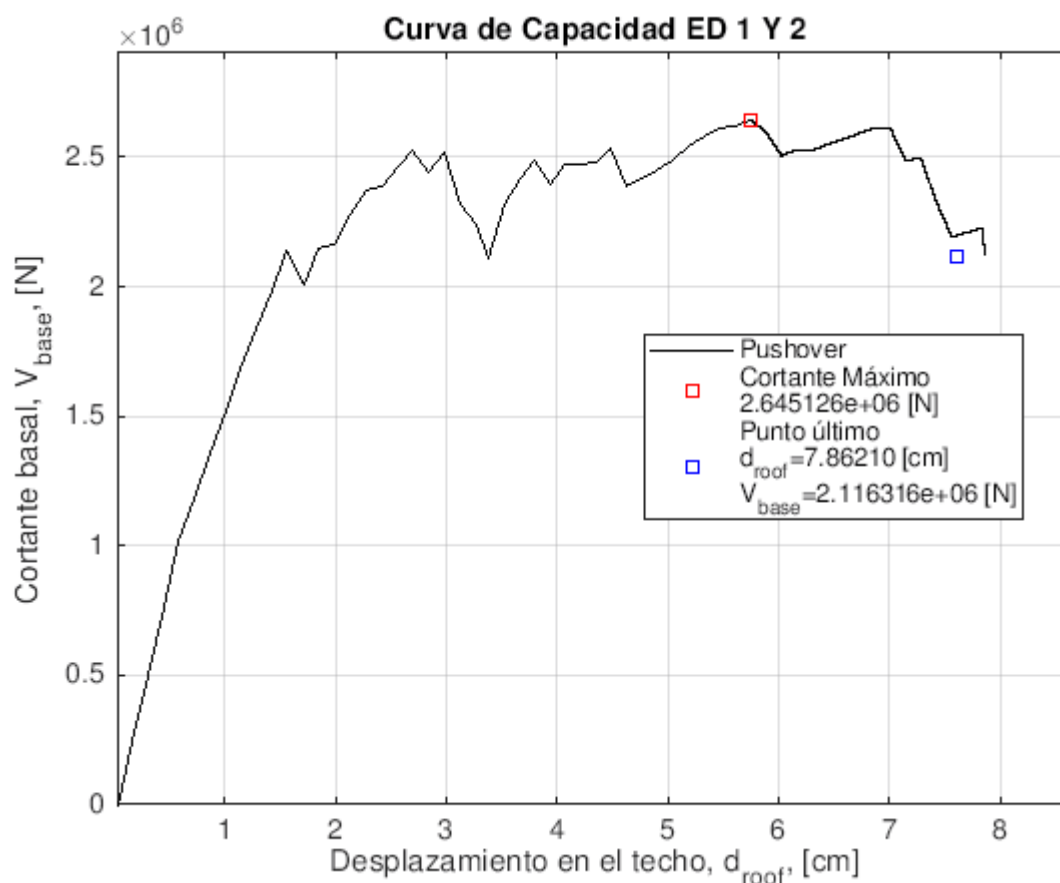


Figura 6.2.3.1. Curva de capacidad del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

A partir de la Figura 6.2.3.1. se extraen los siguientes resultados:

	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
Eje X Positivo AGR	$2,645 \times 10^3$	$2,116 \times 10^3$	7,862

Tabla 6.2.3.1. Resultados curva de capacidad del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

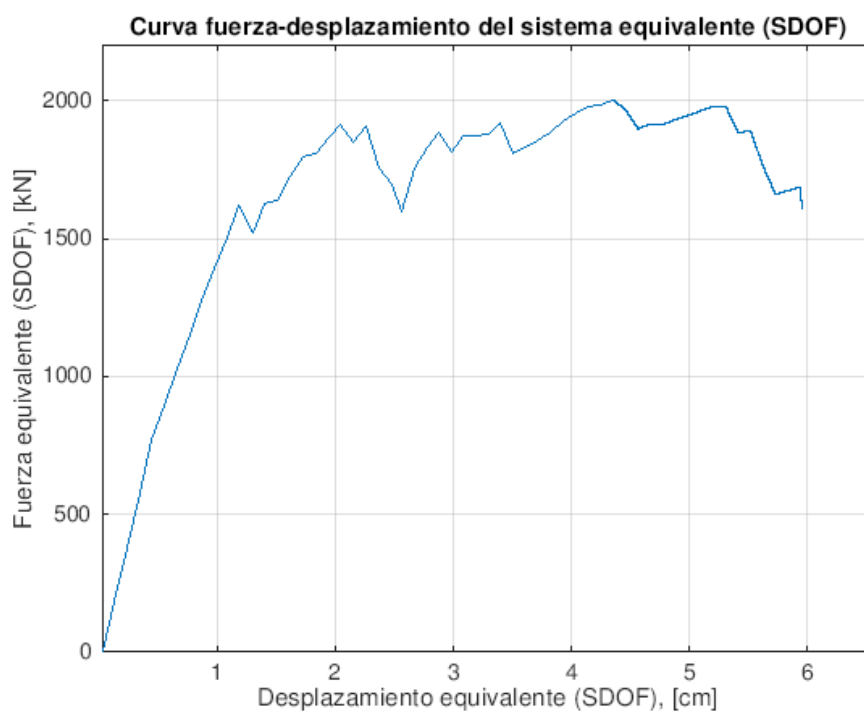


Figura 6.2.3.2. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

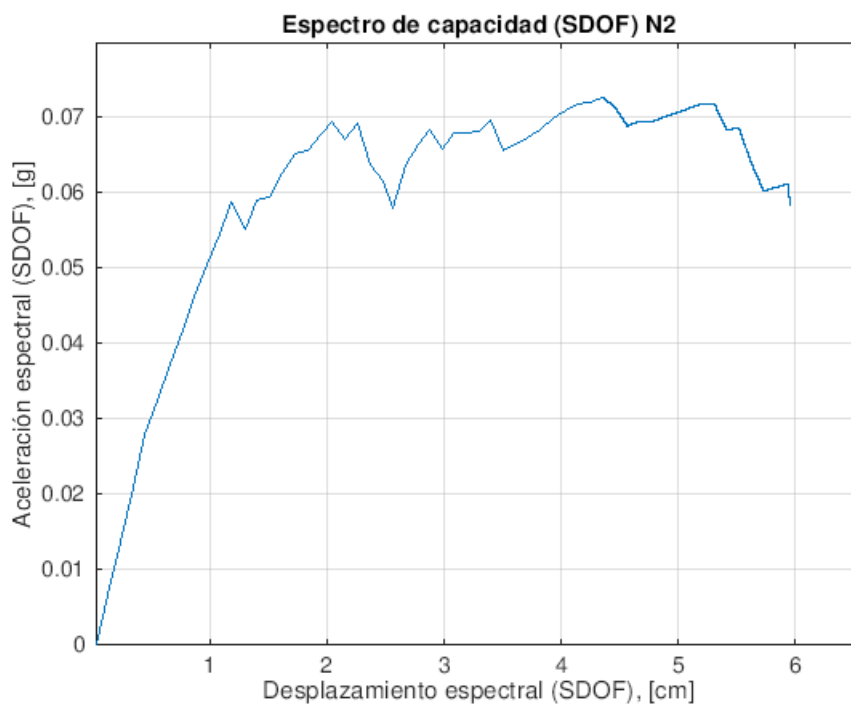


Figura 6.2.3.3. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

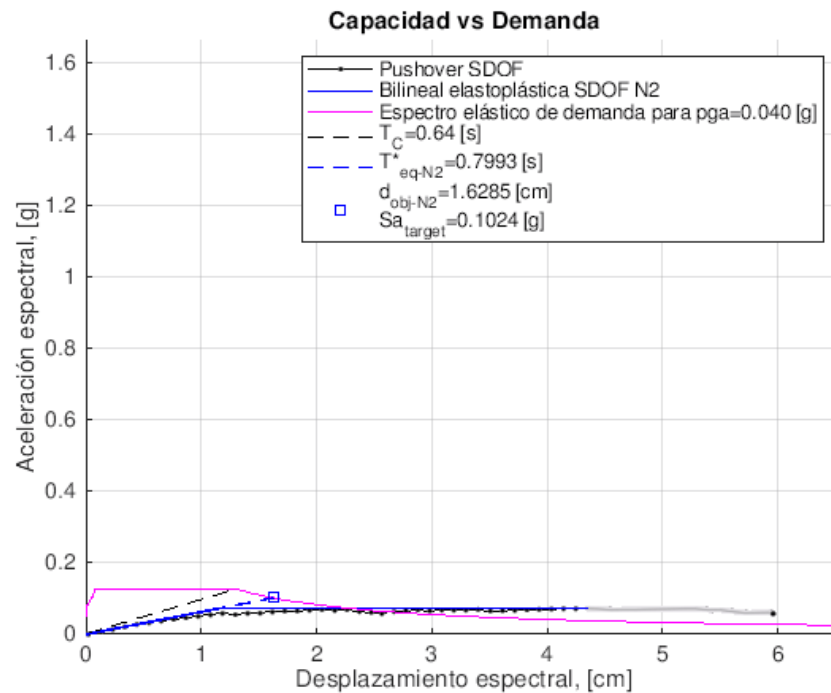


Figura 6.2.3.4. Capacidad frente a demanda con pga=0,04g del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se obtiene en el punto de desempeño un desplazamiento espectral de 1,628cm.

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

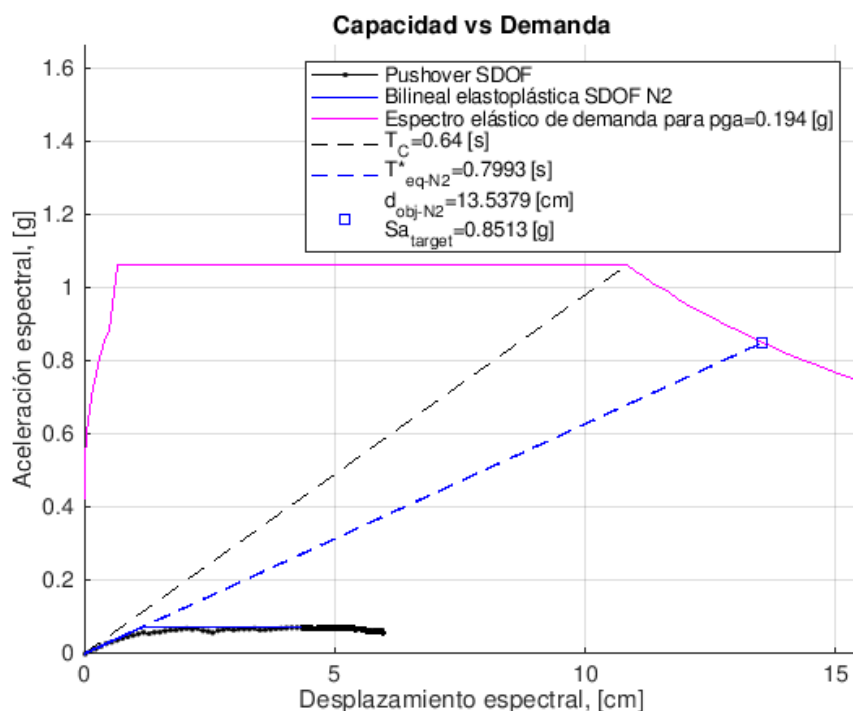


Figura 6.2.3.5. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Agregado en el eje X Positivo
(Fuente: Propia)

Se obtiene que en el punto de desempeño un desplazamiento espectral de 13,538cm.

Se realiza la misma metodología para la dirección X negativa e Y positiva y negativa, a continuación se resumen los resultados obtenidos:

- **Resultados de la curva de capacidad (cortante máximo y punto último):**

	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
Eje X Negativo AGR	$2,689 \times 10^3$	$2,152 \times 10^3$	8,547
Eje Y Positivo AGR	$4,535 \times 10^3$	$3,628 \times 10^3$	5,531
Eje Y Negativo AGR	$4,845 \times 10^3$	$3,877 \times 10^3$	6,518

Tabla 6.2.3.2. Resultados obtenidos en las curvas de capacidad para el Agregado (Fuente: Propia)

- **Resultados de enfrentar la capacidad y la demanda para una aceleración pico de 0,04g:**

	Punto de desempeño	
	Desplazamiento Espectral (cm)	Aceleración Espectral (g)
Eje X Negativo AGR	1,486	0,112
Eje Y Positivo AGR	1,425	0,117
Eje Y Negativo AGR	1,466	0,114

Tabla 6.2.3.3. Resultados capacidad frente demanda para el Agregado con $p_{ga}=0,04g$
(Fuente: Propia)

- **Resultados de enfrentar la capacidad y la demanda para una aceleración pico de 0,194g:**

	Punto de desempeño	
	Desplazamiento Espectral (cm)	Aceleración Espectral (g)
Eje X Negativo AGR	12,353	0,933
Eje Y Positivo AGR	11,845	0,973
Eje Y Negativo AGR	12,184	0,946

Tabla 6.2.3.4. Resultados capacidad frente demanda para el Agregado con $p_{ga}=0,194g$
(Fuente: Propia)

La representación gráfica de dichos resultados, para la dirección X negativa e Y positiva y negativa, se adjunta en el Anexo A3.

6.2.4. Comparativa entre el Edificio 1 y el Agregado

Se muestra gráficamente la comparativa entre las curvas de capacidad en el eje X Positivo cuando el Edificio 1 está aislado y cuando están los dos edificios agregados.

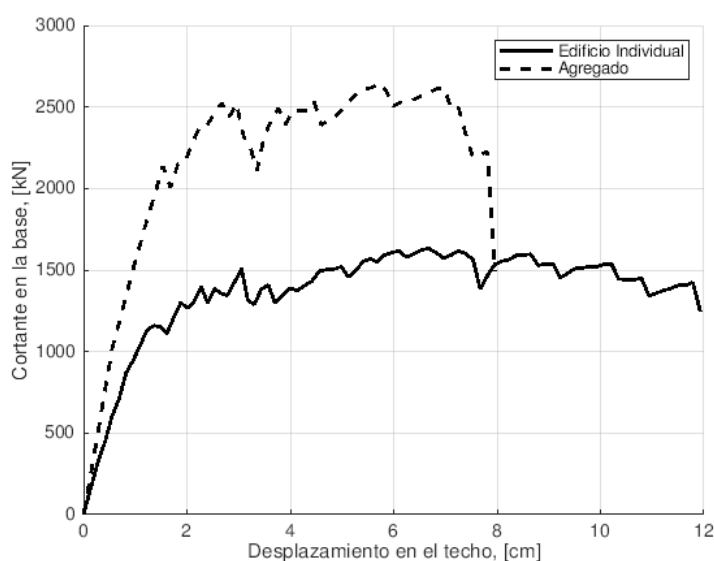


Figura 6.2.4.1. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 1 y el Agregado para el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Las curvas de capacidad en eje X negativo e Y positivo y negativo tienen un comportamiento similar, se adjuntan dichas gráficas en el Anexo A7. Además, en la Tabla 6.2.4.1. se presentan los resultados que permiten comparar el cortante máximo y el punto último cuando el Edificio 1 está aislado y cuando está agregado.

	Edificio 1 Aislado			Edificio Agregado		
	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
X Positivo	$1,632 \times 10^3$	$1,306 \times 10^3$	11,91	$2,645 \times 10^3$	$2,116 \times 10^3$	7,862
X Negativo	$1,692 \times 10^3$	$1,354 \times 10^3$	11,62	$2,689 \times 10^3$	$2,152 \times 10^3$	8,547
Y Positivo	$2,719 \times 10^3$	$2,176 \times 10^3$	5,857	$4,535 \times 10^3$	$3,628 \times 10^3$	5,531
Y Negativo	$2,879 \times 10^3$	$2,304 \times 10^3$	6,187	$4,845 \times 10^3$	$3,877 \times 10^3$	6,518

Tabla 6.2.4.1. Comparativa entre el cortante máximo y el punto último (Fuente: Propia)

A continuación se muestra la contribución de los nodos de la pared con respecto al total del cortante en función de cada dirección y sentido analizado.

	Edificio 1 Aislado		Edificio Agregado		
	Perimetral Izquierda (%)	Perimetral Derecha (%)	Perimetral Izquierda (%)	Medianera Central (%)	Perimetral Derecha (%)
X Positivo	18,91	5,63	12,72	13,75	3,573
X Negativo	5,81	18,82	6,227	18,32	6,503
Y Positivo	32,47	32,53	22,98	22,82	11,48
Y Negativo	32,5	32,54	23,07	22,75	11,47

Tabla 6.2.4.2. Contribución de los nodos de la pared al total del cortante (Fuente: Propia)

En el Anexo A8 se adjunta la comparativa gráfica de los valores obtenidos de contribución de los nodos para todas las direcciones y sentidos del estudio.

6.2.5. Comparativa entre el Edificio 2 y el Agregado

Se muestra gráficamente la comparativa entre las curvas de capacidad cuando el Edificio 2 está aislado y cuando están los dos edificios agregados.

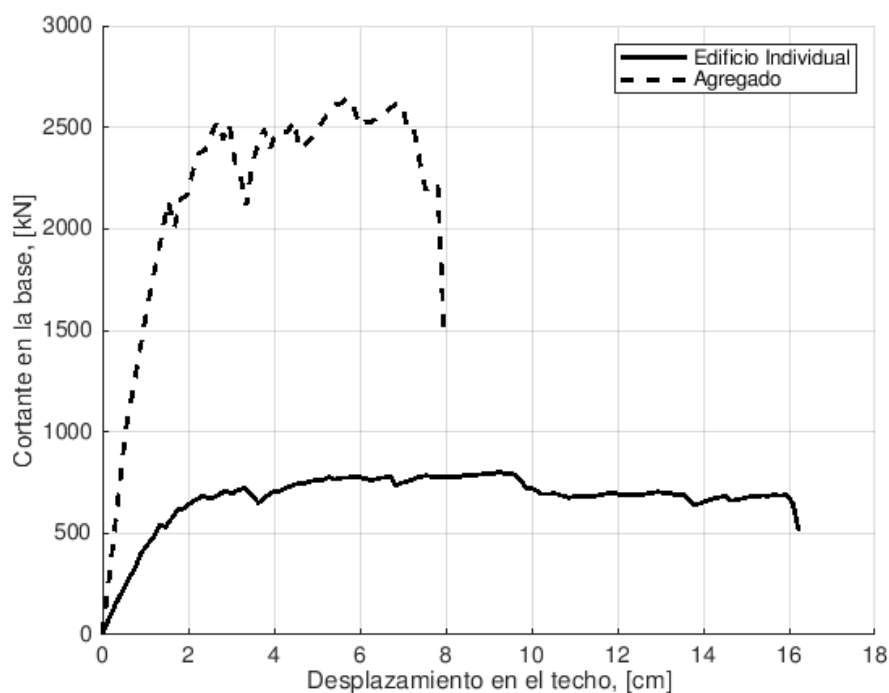


Figura 6.2.5.1. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 2 y el Agregado para el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Las curvas de capacidad en eje X positivo e Y positivo y negativo tienen un comportamiento similar, se adjuntan dichas gráficas en el Anexo A7. Además, en la Tabla 6.2.5.1. se presentan los resultados que permiten comparar el cortante máximo y el punto último cuando el Edificio 2 está aislado y cuando está agregado.

	Edificio 2 Aislado			Edificio Agregado		
	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)	Cortante máximo (kN)	Cortante en la base (kN)	Desplazamiento en el techo (cm)
X Positivo	802,550	688,920	15,95	$2,645 \times 10^3$	$2,116 \times 10^3$	7,862
X Negativo	$8,33 \times 10^2$	698,550	13,70	$2,689 \times 10^3$	$2,152 \times 10^3$	8,547
Y Positivo	1.576,310	1.544,730	5,080	$4,535 \times 10^3$	$3,628 \times 10^3$	5,531
Y Negativo	1.717,120	1.426,460	7,010	$4,845 \times 10^3$	$3,877 \times 10^3$	6,518

Tabla 6.2.5.1. Comparativa entre el cortante máximo y el punto último (Fuente: Propio)

A continuación se muestra la contribución de los nodos de la pared con respecto al total del cortante en función de cada dirección y sentido analizado.

	Edificio 2 Aislado		Edificio Agregado		
	Perimetral Izquierda (%)	Perimetral Derecha (%)	Perimetral Izquierda (%)	Medianera Central (%)	Perimetral Derecha (%)
X Positivo	24,67	3,693	12,72	13,75	3,573
X Negativo	6,058	24,57	6,227	18,32	6,503
Y Positivo	28,61	28,5	22,98	22,82	11,48
Y Negativo	28,54	28,07	23,07	22,75	11,47

Tabla 6.2.5.2. Contribución de los nodos de la pared al total del cortante (Fuente: Propia)

En el Anexo A8 se adjunta la comparativa gráfica de los valores obtenidos de contribución de los nodos para todas las direcciones y sentidos del estudio.

6.3. Fragilidad

Se representan las curvas de fragilidad para cada hipótesis planteada según los parámetros definidos en el apartado de Metodología.

6.3.1. Primera hipótesis: Edificio 1

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje X en sentido Positivo.

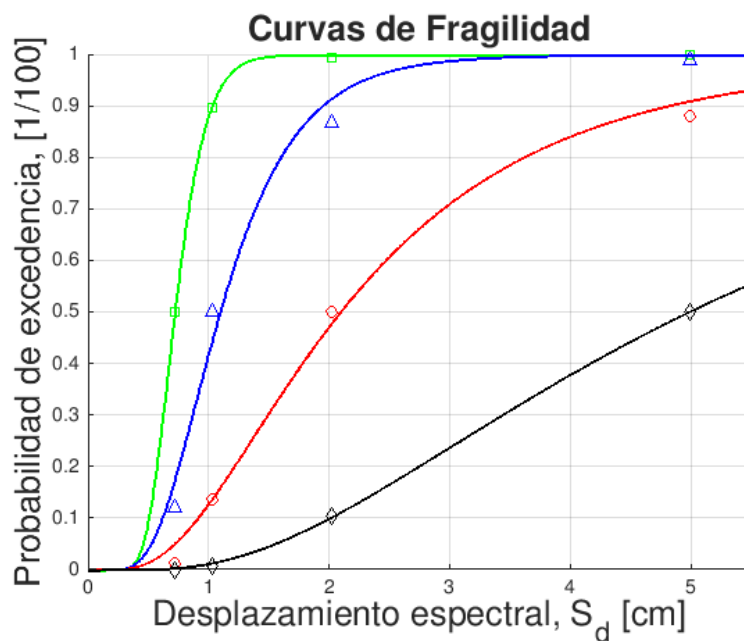


Figura 6.3.1.1. Curvas de fragilidad del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

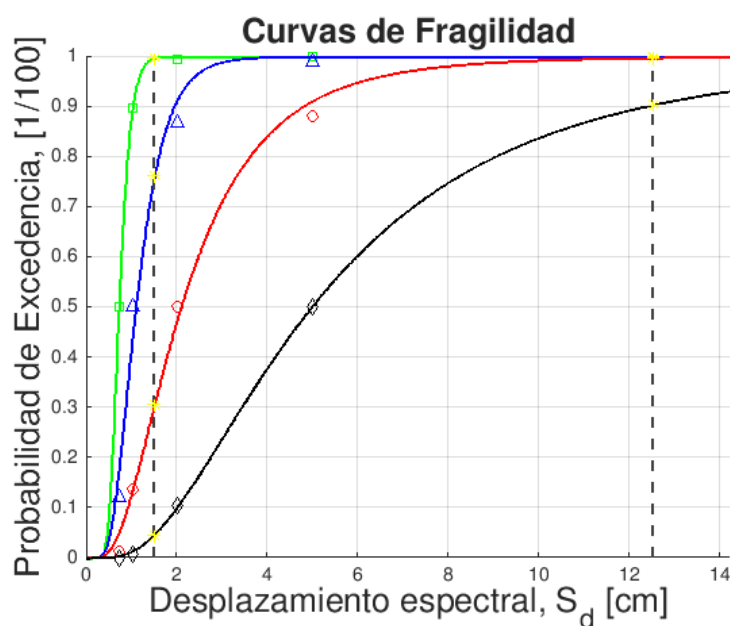


Figura 6.3.1.2. Curva de fragilidad del Edificio 1 en el eje X Positivo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

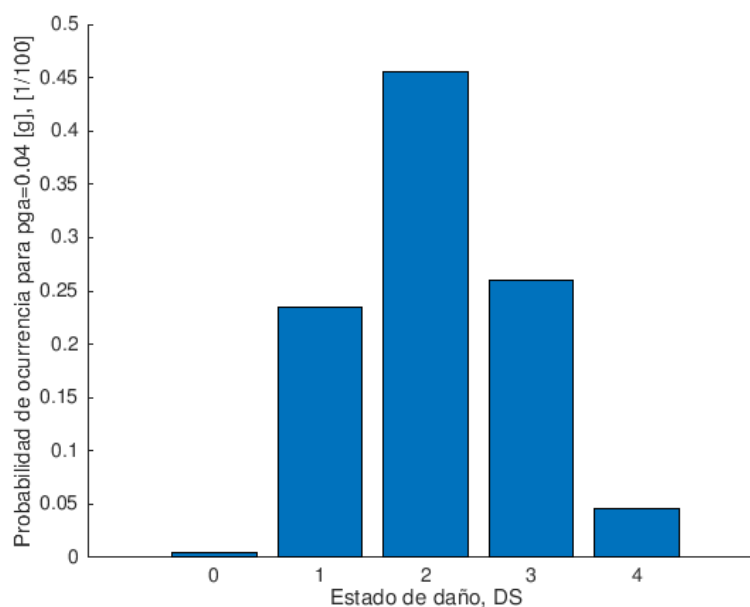


Figura 6.3.1.3. Estado de daño con $p_{ga}=0,04$ g del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

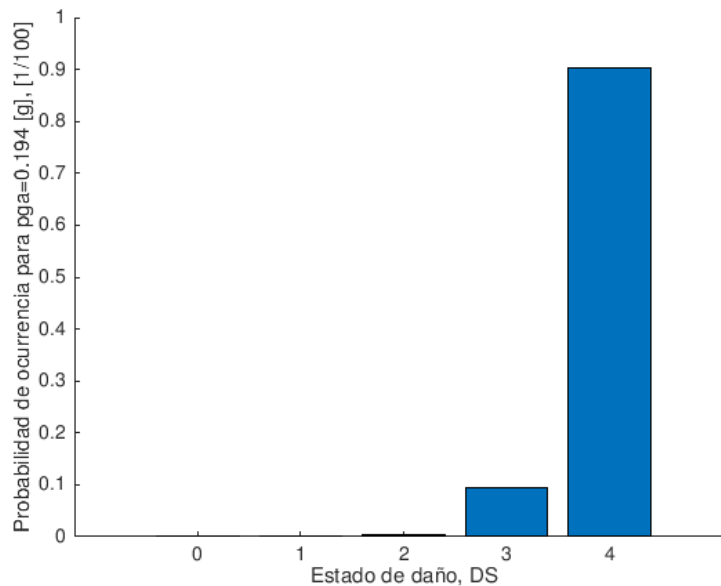


Figura 6.3.1.4. Estado de daño con $p_{ga}=0,194$ g del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.



Figura 6.3.1.5. Índice de daño del Edificio 1 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

En la Tabla 6.3.1.1. se resumen los resultados de los estados de daño para la dirección X positiva y negativa y para la dirección Y positiva y negativa cuando la aceleración pico es de 0,04g.

	S_{d0} (%)	S_{d1} (%)	S_{d2} (%)	S_{d3} (%)	S_{d4} (%)
X Positivo	0,4	23,47	45,54	26,01	4,578
X Negativo	0,48	26	45,45	24,13	3,94
Y Positiva	31,35	48,38	15,9	3,9	0,463
Y Negativa	42,32	57,56	0	0,2	0

Tabla 6.3.1.1. Probabilidad de ocurrencia para $p_{ga}=0,04g$ en el Edificio 1 (Fuente: Propia)

En la Tabla 6.3.1.2. se resumen los resultados de los estados de daño para la dirección X positiva y negativa y para la dirección Y positiva y negativa cuando la aceleración pico es de 0,194g.

	Sd ₀ (%)	Sd ₁ (%)	Sd ₂ (%)	Sd ₃ (%)	Sd ₄ (%)
X Positivo	0	0	0,3	9,433	90,27
X Negativo	0	0	0,563	12,89	86,55
Y Positiva	0	0	0	0	100
Y Negativa	0	0	0	0	100

Tabla 6.3.1.2. Probabilidad de ocurrencia para pga=0,194g en el Edificio 1 (Fuente: Propia)

Se adjunta la representación gráfica en el Anexo A4 para la dirección X positiva e Y negativa y positiva.

6.3.2. Primera hipótesis: Edificio 2

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje X en sentido Positivo.

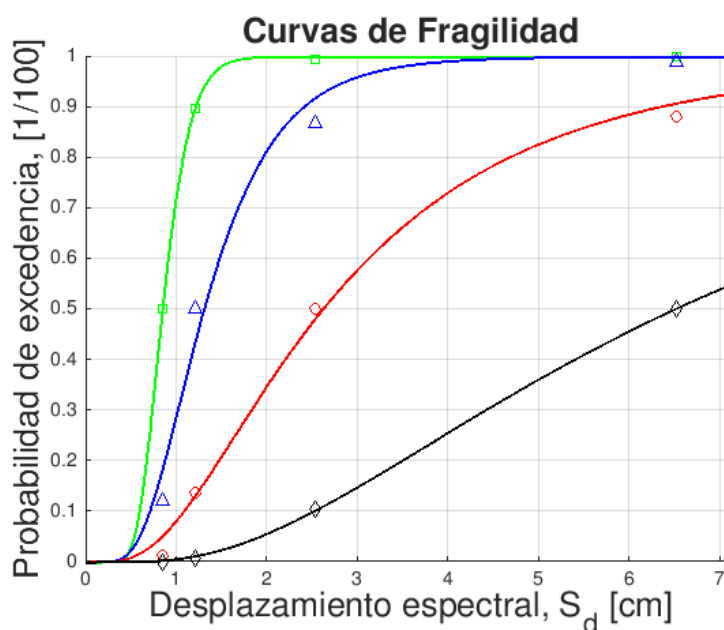


Figura 6.3.2.1. Curvas de fragilidad del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

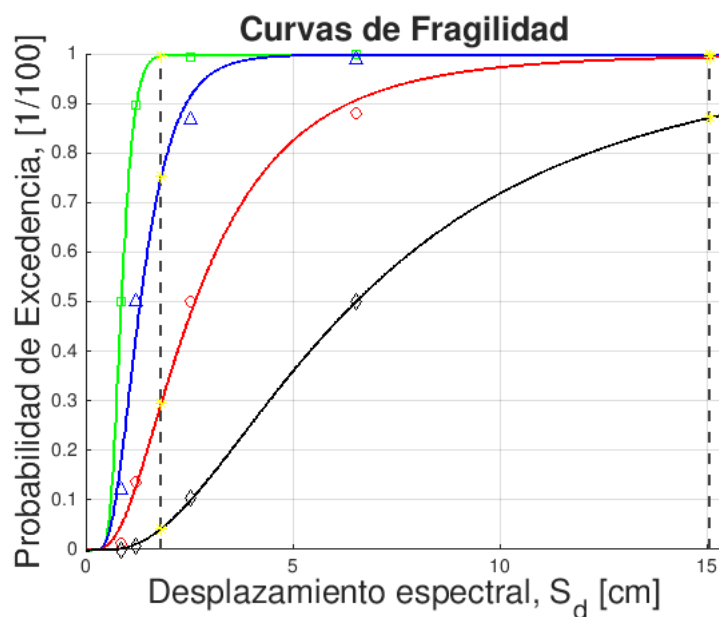


Figura 6.3.2.2. Curva de fragilidad del Edificio 2 en el eje X Positivo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

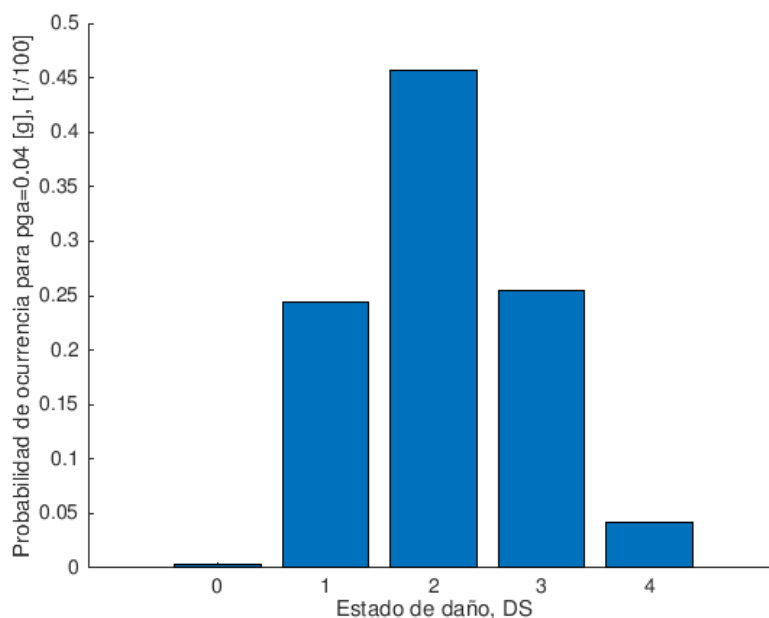


Figura 6.3.2.3. Estado de daño con $p_{ga}=0,04g$ del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

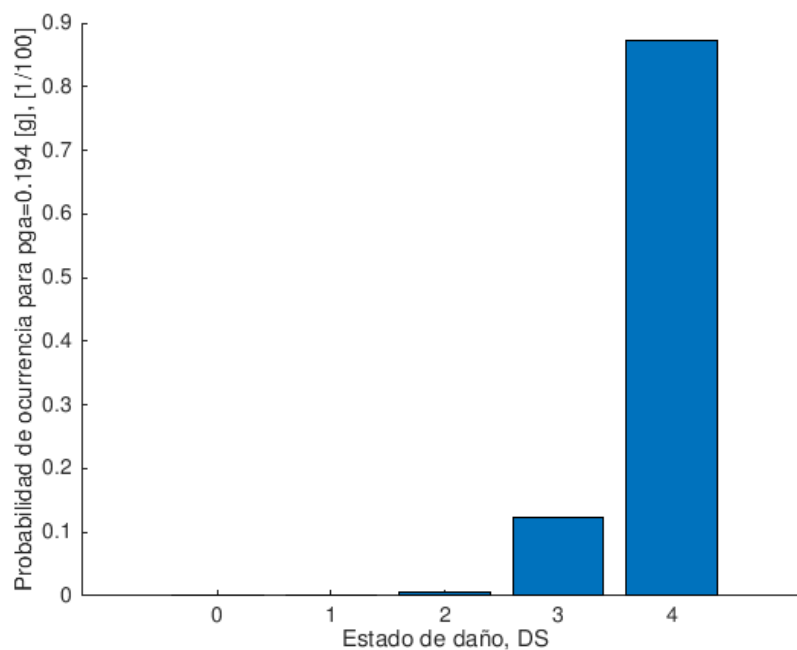


Figura 6.3.2.4. Estado de daño con pga=0,194g del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.



Figura 6.3.2.5. Índice de daño del Edificio 2 en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

En la Tabla 6.3.2.1. se resumen los resultados de los estados de daño para la dirección X positiva y negativa y para la dirección Y positiva y negativa cuando la aceleración pico es de 0,04g.

	Sd ₀ (%)	Sd ₁ (%)	Sd ₂ (%)	Sd ₃ (%)	Sd ₄ (%)
X Positivo	0,327	24,38	45,69	25,42	4,18
X Negativo	0,33	23,71	45,67	25,92	4,36
Y Positiva	26,08	47,27	19,79	6,122	0,736
Y Negativa	33,85	49,42	13,98	2,48	0,26

Tabla 6.3.2.1. Probabilidad de ocurrencia para pga=0,04g en el Edificio 2 (Fuente: Propia)

En la Tabla 6.3.2.2. se resumen los resultados de los estados de daño para la dirección X positiva y negativa y para la dirección Y positiva y negativa cuando la aceleración pico es de 0,194g.

	Sd ₀ (%)	Sd ₁ (%)	Sd ₂ (%)	Sd ₃ (%)	Sd ₄ (%)
X Positivo	0	0	0,562	12,3	87,14
X Negativo	0	0	0,467	11,2	88,33
Y Positiva	0	0	0	0	100
Y Negativa	0	0	0	0	100

Tabla 6.3.2.2. Probabilidad de ocurrencia para pga=0,194g en el Edificio 2 (Fuente: Propia)

Se adjunta la representación gráfica en el Anexo A5 para la dirección X positiva e Y negativa y positiva.

6.3.3. Segunda hipótesis: Edificios Agregados

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje X en sentido Positivo para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

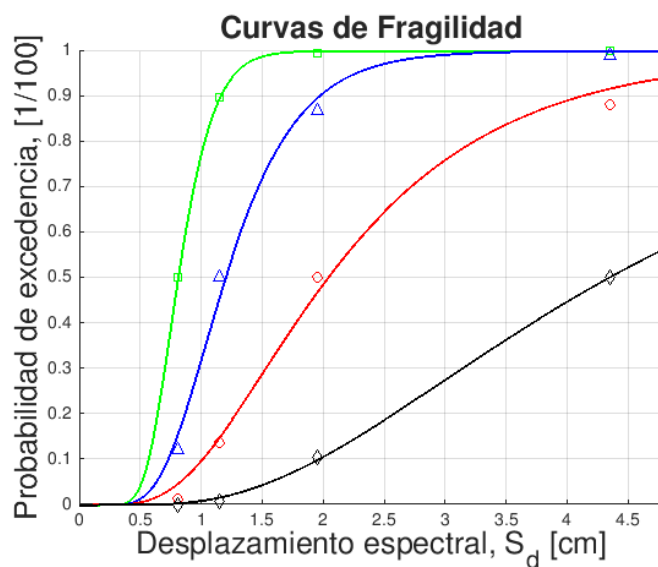


Figura 6.3.3.1. Curvas de fragilidad del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

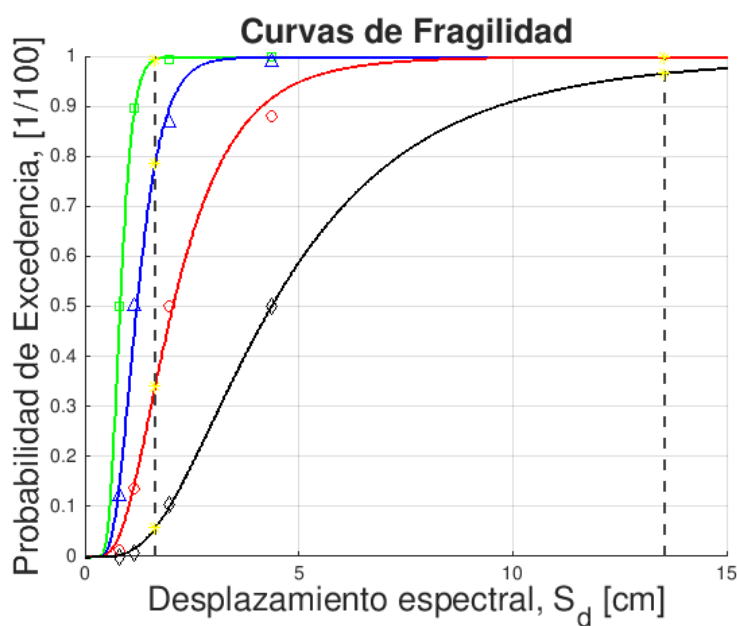


Figura 6.3.3.2. Curva de fragilidad del Agregado en el eje X Positivo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

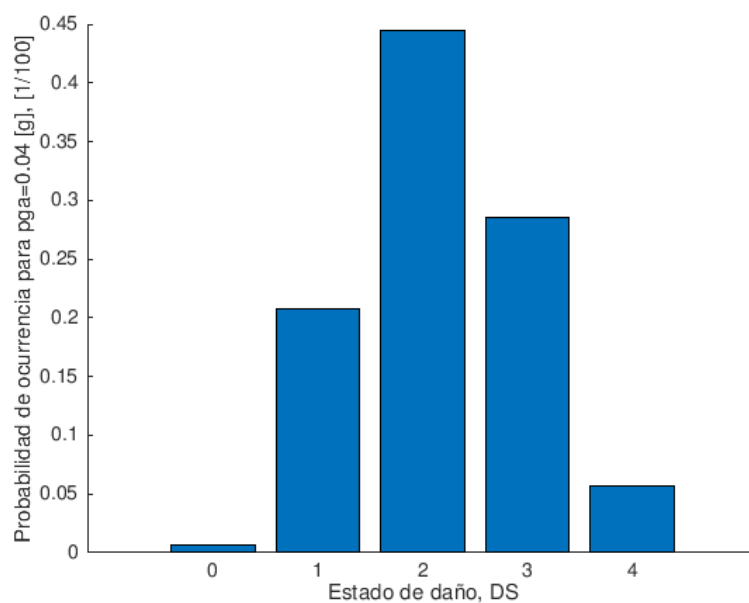


Figura 6.3.3.3. Estado de daño con pga=0,04g del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

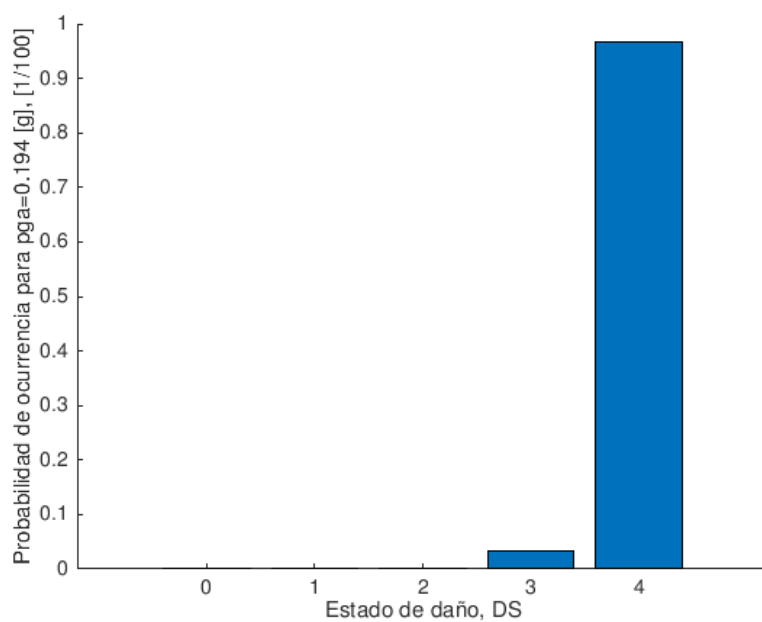


Figura 6.3.3.4. Estado de daño con pga=0,194g del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

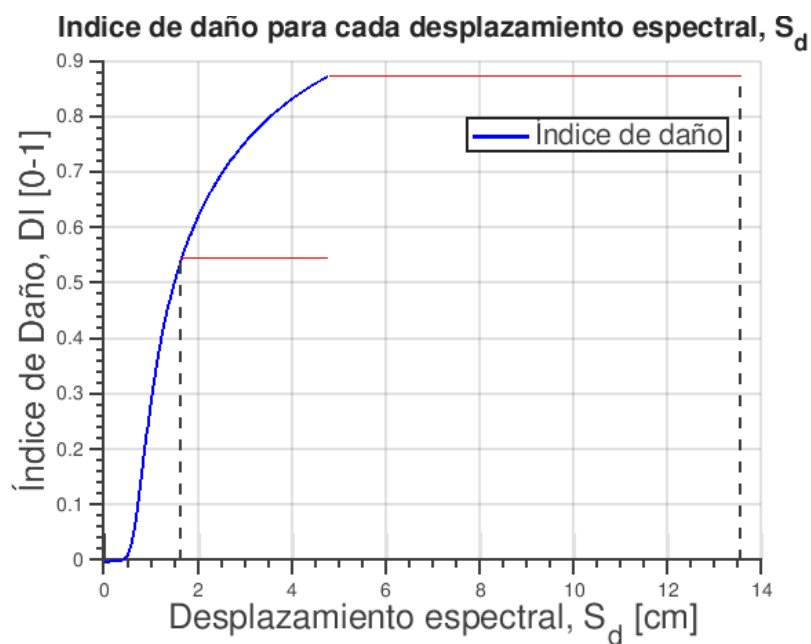


Figura 6.3.3.5. Índice de daño del Agregado en el eje X Positivo (Fuente: Propia)

En la Tabla 6.3.3.1. se resumen los resultados de los estados de daño para la dirección X positiva y negativa y para la dirección Y positiva y negativa cuando la aceleración pico es de 0,04g.

	Sd_0 (%)	Sd_1 (%)	Sd_2 (%)	Sd_3 (%)	Sd_4 (%)
X Positivo	0,608	20,73	44,46	28,52	5,68
X Negativo	0,296	20,66	45,55	27,95	5,54
Y Positiva	30,67	46,91	16,38	5,42	0,617
Y Negativa	44,46	43,19	9,65	2,42	0,28

Tabla 6.3.3.1. Probabilidad de ocurrencia para $p_{ga}=0,04g$ en el Agregado (Fuente: Propia)

En la Tabla 6.3.3.2. se resumen los resultados de los estados de daño para la dirección X positiva y negativa y para la dirección Y positiva y negativa cuando la aceleración pico es de 0,194g.

	Sd ₀ (%)	Sd ₁ (%)	Sd ₂ (%)	Sd ₃ (%)	Sd ₄ (%)
X Positivo	0	0	0	3,315	96,66
X Negativo	0	0	0	7,44	92,4
Y Positiva	0	0	0	0,387	99,613
Y Negativa	0	0	0	0	100

Tabla 6.3.3.2. Probabilidad de ocurrencia para pga=0,194g en el Agregado (Fuente: Propia)

Se adjunta la representación gráfica en el Anexo A6 para la dirección X positiva e Y negativa y positiva.

7. Análisis del impacto ambiental

En este apartado se valoran las consecuencias ambientales que produce la realización del presente trabajo. Como conclusión general, no se ha generado un gran impacto ambiental ya que el trabajo se ha realizado íntegramente con ordenador y no se ha requerido ningún material para realizar simulaciones o elaborar ningún tipo de experimento. Estas dos técnicas utilizadas para elaborar un proyecto sí que tienen asociadas mayores consecuencias ambientales.

Otro factor importante que reduce considerablemente el impacto ambiental es el formato de entrega, ya que actualmente se debe hacer a través de una plataforma web dónde se sube el trabajo. De este modo se genera un gran ahorro en la impresión de las páginas de la memoria y se contribuye a reducir una de las principales causas de deforestación.

En este trabajo se considera que el mayor consumo que se ha generado ha sido el de la electricidad, debido a que todas las partes del proyecto han requerido la utilización de un ordenador, tanto en la parte de redacción como en la parte de simulación para la obtención de los resultados. Además, se puede incluir la iluminación y la climatización de la sala dónde se ha realizado la memoria. Este último factor se considera inevitable ya que es un gasto indispensable para poder trabajar y realizar todo el proyecto.

A continuación se presenta una tabla con las emisiones de CO₂ derivadas del consumo eléctrico, las cuales contribuyen en el impacto ambiental:

Concepto	Tiempo (h)	Potencia (W)	Energía (kWh)	Consumo CO ₂ (kg)
Ordenador	600	45	27	10,395
Electricidad	600	90	54	20,79
			TOTAL	31,185 kg de CO₂

Tabla 7.1. Emisiones de CO₂ originadas por el consumo eléctrico (Fuente: Propia)

Para realizar los cálculos y determinar el consumo de CO₂ se ha considerado un factor de emisión de 0,385kg de CO₂ equivalente por cada kWh de energía consumida.

8. Conclusiones

Los edificios representativos del Eixample elegidos para este trabajo, contruidos sin ningún tipo de consideración en el diseño sismorresistente, tienen probabilidades de daño que varían de acuerdo a la demanda sísmica aplicada.

Este tipo de estudios es relevante, ya que la mayoría de los edificios del Eixample son de mampostería no-reforzada sin ninguna consideración sísmica en su diseño, además dichas estructuras tienen más de 100 años de antigüedad, con lo que sobrepasan su vida útil ampliamente. Otros aspectos a tomar en cuenta incluyen la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en los edificios, las diferentes dimensiones de los edificios alledaños, ya que en muchos casos no son iguales, el número de niveles y la altura de éstos, entre otros. Estos factores afectan de una manera importante en el comportamiento de las diferentes estructuras.

Se puede afirmar para todos los casos de estudio, es decir, para la primera y la segunda hipótesis, se observa que en el análisis modal se puede justificar la utilización del método N2, ya que es en el primer modo de vibración donde se ha movido el porcentaje mayor de masa. El uso de métodos simplificados como los métodos estáticos no lineales (NSP) permite realizar valoraciones de la respuesta estructural de manera sencilla y con una elevada certeza, ahorrando con ello recursos computacionales y tiempo, permitiendo así una mayor aplicación de los mismos.

Al comparar las curvas de capacidad de los edificios modelados de manera aislada y del edificio agregado en ambas direcciones, se observa que en ambos casos de estudio tienen un comportamiento similar, sin embargo se observa que en el caso de los edificios aislados existe un comportamiento más dúctil, es decir, presenta un mayor desplazamiento en el techo aunque soporta menores fuerzas de corte que cuando los dos edificios están agregados. Lo anterior se deriva del hecho de que el agregado consta de una planta mucho más grande, por ende menos esbelta, que impide que se alcancen los desplazamientos que se alcanzan en los modelos individuales. En los dos casos de estudio se ha definido un espesor para las paredes medianeras y perimetrales laterales de 30cm. A pesar de que un edificio aislado tendría paredes de 15cm en sus laterales, al construir un edificio alledaño, dichas paredes de engrosan con 15cm en la nueva construcción. Al momento de que uno de estos edificios es derribado para dar cabida a una nueva estructura, los 15cm adicionales no se eliminan, ya que su conexión con la pared del edificio que se mantiene en pie se considera suficientemente fuerte, por lo que su eliminación podría causar problemas en la pared alledaña.

Además, se ha observado que la curva de capacidad en cualquiera de las direcciones de estudio se compone en su totalidad por la sumatoria de las curvas de capacidad de las paredes alineadas en esa misma dirección. Por ejemplo, en la curva de capacidad en dirección X considera los nodos de las

paredes que están alineados en dicha dirección, pero también tiene en cuenta las paredes alineadas en la dirección ortogonal, Y, ya que comparten alguno de los nodos. En el caso de las curvas de capacidad en dirección Y sucede lo contrario a lo indicado. Esta contribución solo se tiene en cuenta en una dirección, evitando de este modo duplicar las contribuciones.

Al estudiar la contribución de fuerzas en los nodos de las paredes se ha concluido que cuando el edificio está agregado al estudiar la dirección X negativa se observa que la pared izquierda en el Edificio 1 tiene una gran contribución, esto es debido a que la longitud de las paredes es diferente, la pared del Edificio 2 es menor que la del Edificio 1. En el caso de los edificios aislados el comportamiento es aproximadamente igual pero a la inversa dependiendo del sentido en el que se realiza el análisis.

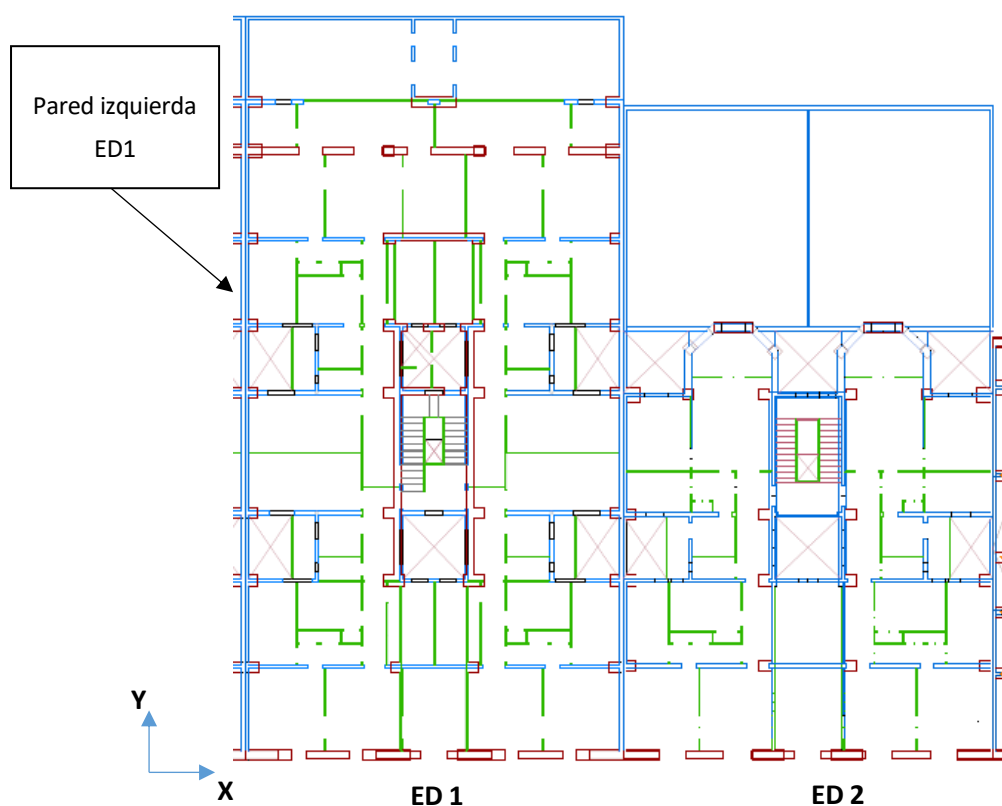


Figura 8.1. Plano de los dos edificios a estudiar (Fuente:Propia)

Se observa que cuando se aplica una aceleración pico en el terreno de 0,04g, según marca la normativa NCSE-02 para la zona de Barcelona, tanto cuando los edificios están aislados como agregados, tienen una probabilidad considerable de daño moderado o severo para la dirección X. En cambio, en la dirección Y, se concluye para los casos de estudio que generalmente tiende a tener una probabilidad de daño moderado, con lo que la estructura presentaría estados de daño inferiores que en la dirección Y.

Por otro lado, al aplicar una aceleración pico en el terreno de 0,194g como se indica en el estudio de Irizarry para la zona del Eixample, los daños que sufren los edificios son muy importantes. Se observa en todos los casos de estudio que la mayor contribución de probabilidad de daño está en el estado de daño completo.

La selección de una correcta demanda sísmica es importante ya que los resultados que se obtienen son diferentes, como se observa al aplicar diferentes aceleraciones pico del terreno. Es por esto que a pesar de los criterios que marca la normativa vigente, se han de realizar estudios de microzonación para aproximar correctamente la demanda, ya que estas diferencias pueden significar estar en un estado de daño inferior o superior, llevando a una mala conclusión en la evaluación de la estructura.

9. Presupuesto y/o Análisis Económico

A continuación se detallan los costes asociados a la elaboración del trabajo. El presupuesto del trabajo tienen en cuenta los costes de los softwares empleados para la obtención y representación de los resultados y las horas de trabajo asociadas a la redacción del proyecto. Además, como el trabajo se ha realizado íntegramente con ordenador portátil se añaden los costes relacionados a la compra del ordenador y el consumo de energía eléctrica.

Se ha considerado que el coste medio para un Ingeniero Junior es de 30€/h.

Licencias	Duración	Coste (€)
Matlab Standard	1 año	2.000
Tremuri	3 meses	790
Autocad	1 año	2.075,15
	TOTAL	4.865,15 €

Tabla 9.1. Coste de las Licencias para los programas utilizados (Fuente: Propia)

Al ser estudiante las licencias de Autocad y Matlab han sido gratuitas, así que el coste asociado a dichas licencias en este caso ha sido nulo.

Concepto	Precio/hora (€/h)	Horas
Coste ingeniero Junior	30	600
	TOTAL	18.000 €

Tabla 9.2. Coste de un ingeniero Junior (Fuente: Propia)

Concepto	Consumo (W)	Coste/kWh	Horas
Consumo Energético	90	0,31	600
		TOTAL	16,74 €

Tabla 9.3. Coste del consumo eléctrico (Fuente: Propia)

Concepto	Coste (€)
Ordenador portátil Acer	500

Tabla 9.4. Coste ordenador portátil de la marca Acer (Fuente: Propia)

El coste total de trabajo es de **23.381,89 €**, para completar el coste total del proyecto se debe considerar el 21% de IVA, con lo cual el coste total es de **28.292,087 €**.

10. Bibliografía

- Alcantara, Kelly, and Carlos Nalvarte. 2016. "Desempeño Estructural Aplicando La Norma ATC – 40 para el Reforzamiento del Pabellón ' Monoblock ' Del Instituto Nacional De Salud Del Niño (Breña – Lima)."
- "ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings". Applied Technology Council (November 1996).
- Ayuntamineto de Barcelona "El Distrito y sus Barrios" .s.f.
<https://ajuntament.barcelona.cat/ciutatvella/es/el-distrito-y-sus-barrios/el-distrito-y-sus-barrios> (Último acceso: Octubre 2018).
- "Barcelona y El Plan Cerdà". 1960. Revista de Obras Públicas (Enero 1960).
- Barbat, Alex H., y Lluís Pujades. 2004. "Evaluación de La Vulnerabilidad y Del Riesgo Sísmico En Zonas Urbanas. Aplicación a Barcelona". *SÍSMICA 2004 - 6º Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica*.
- Barbat, Alex H., y Roberto Aguiar. 2003. "Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras".
- Bonett, Ricardo, Alex H. Barbat, y Lluís Pujades. 2004. "Curvas de Fragilidad Sísmica Para Edificios Tradicionales de Mampostería No Reforzada de Barcelona, España". *SÍSMICA 2004 - 6º Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica*.
- Cartoteca Difital. s.f. . "Plano de Los Alrededores de La Ciudad de Barcelona y Proyecto de Su Reforma y Ensanche / El Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Ildefonso Cerdà ; Pedro Roca Fecit (Abril de 1861) :: Mapes de Catalunya (s.XVI-XX)".
<http://cartotecadigital.icgc.cat/cdm/singleitem/collection/catalunya/id/1804/rec/9> (Último acceso: Noviembre 2018).
- Crisafulli, Francisco, y Elbio Villafañe. 2002. "Espectros de Respuesta y de Diseño".
- "European Standard Europäische Norm". European Standard. December 2004.
- Fajfar, Peter. 1999. "Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra".
- Fajfar, Peter. 2000. "A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design".
- Fajfar, Peter, y Matej Fischinger. 1988. "N2 - A Method for Non-Linear Seismic Analysis of Regular Buildings". Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering.
- Galasco, Alessandro, Sergio Lagomarsino, Andrea Penna, y Sonia Resemini. 2004. "Non-Linear Seismic Analysis of Masonry Structures". *13th World Conference on Earthquake Engineering*.

- Gonzalez-Drigo, Ramón, Jorge Avila, Lluís Pujades, y Alex H. Barbat. 2017. "Non-Linear Static Procedures Applied to High-Rise Residential URM Buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering* 15.
- Goolzoom. s.f. .
<https://es.goolzoom.com/mapas/> (Último acceso: Diciembre 2018).
- Icerda. 2008 . "El Pla Cerdà Un Model d'urbanisme".
<http://www.icerda.org/cat/> (Último acceso: Octubre 2018).
- Irizarry, Janira. 2004. "An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the UrbanSystem of Barcelona".
- Ministerio de Fomento. 2002. "Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02".
- Ministerio de Fomento. s.f. . "Antecedentes Sismorresistentes en España".
<https://www.fomento.gob.es/organos-colegiados/comision-permanente-de-normas-sismorresistentes/cpns/normativa> (Último acceso: Noviembre 2018).
- Ministerio de planificacion del Desarrollo. 1974. "Norma Sismorresistente PDS-1".
- Moreno, Rosángel, y Jesús M. Bairán. 2010. "Curvas de Fragilidad para Evaluar el Daño Sísmico en Edificios de Concreto Armado con Losas Reticulares".
- Presidencia del Gobierno. 1969. "Norma Sismorresistente PGS-1. Parte A".
- Pujades, Lluís, Alex H. Barbat, Ramón González-Drigo, Jorge Avila, y Sergio Lagomarsino. 2012. "Seismic Performance of a Block of Buildings Representative of the Typical Construction in the Eixample District in Barcelona (Spain)". *Bulletin of Earthquake Engineering* 10.
- Sarratosa, Albert. s.f. . "El Valor de l'Eixample de Cerdà, Avui".

Anexo A

A1. Representación gráfica de los resultados del Análisis estático no lineal en el Edificio 1 aislado

- Dirección en el eje X sentido Negativo

Se presenta el análisis en el eje X en sentido negativo para el Edificio 1 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 2.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 1 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

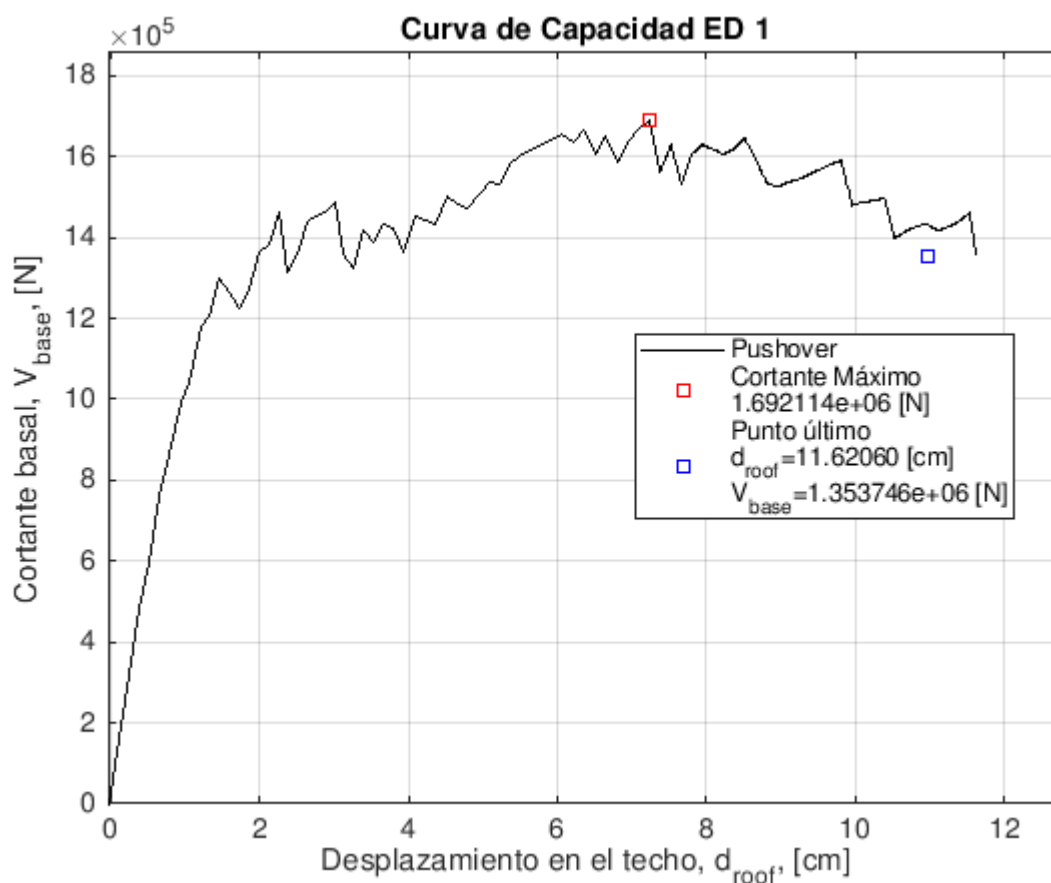


Figura A1.1. Curva de capacidad del Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

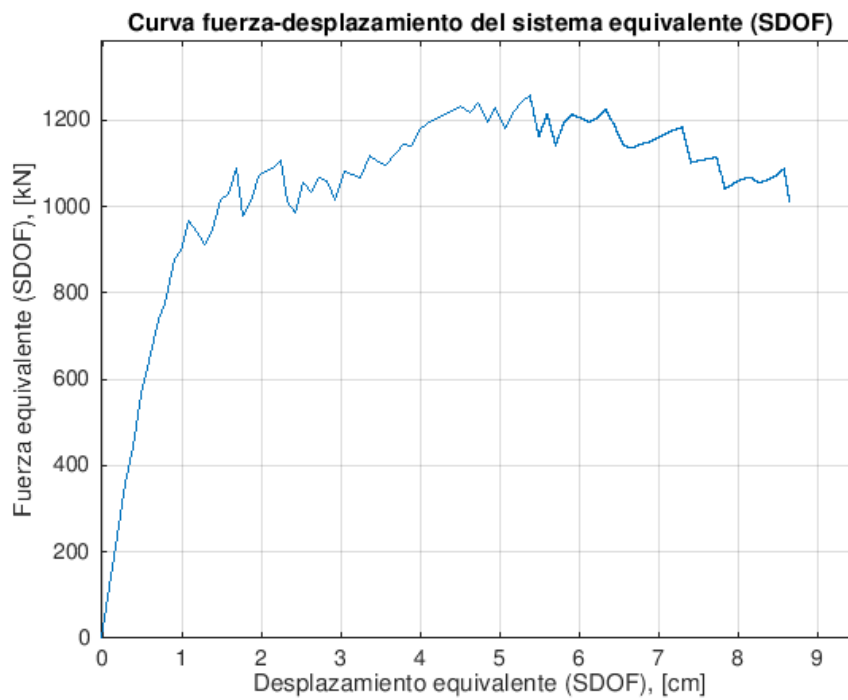


Figura A1.2. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad en el Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

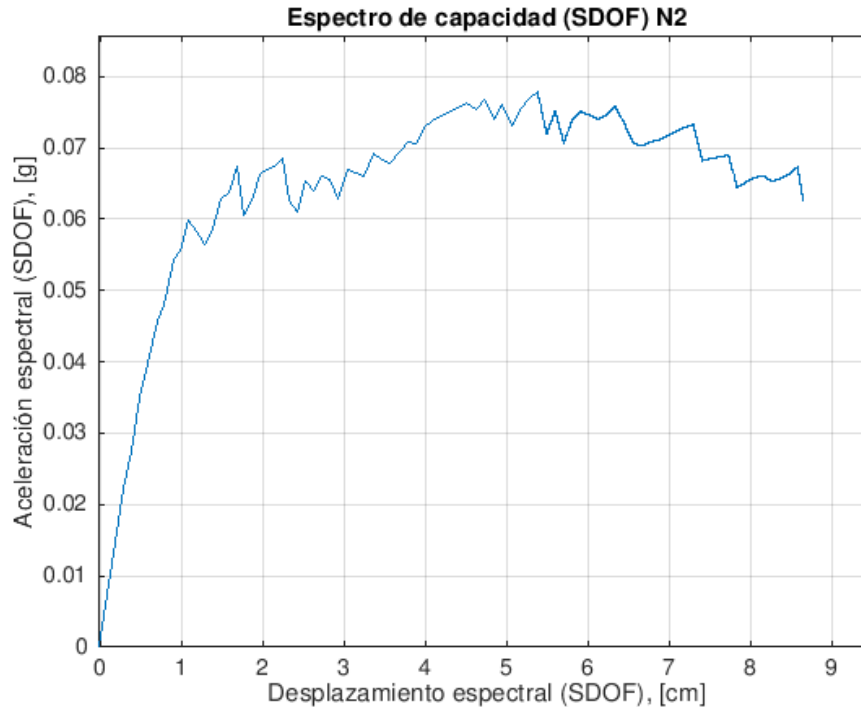


Figura A1.3. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad libertad en el Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

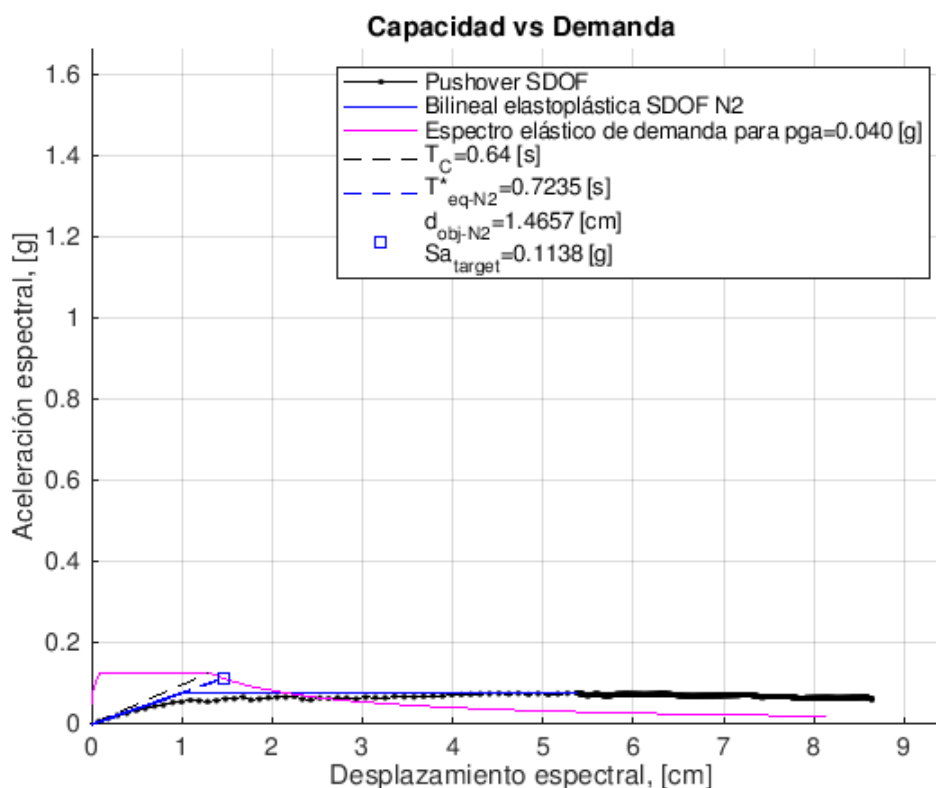


Figura A1.4. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ libertad en el Edificio 1 en el eje X Negativo
(Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona..

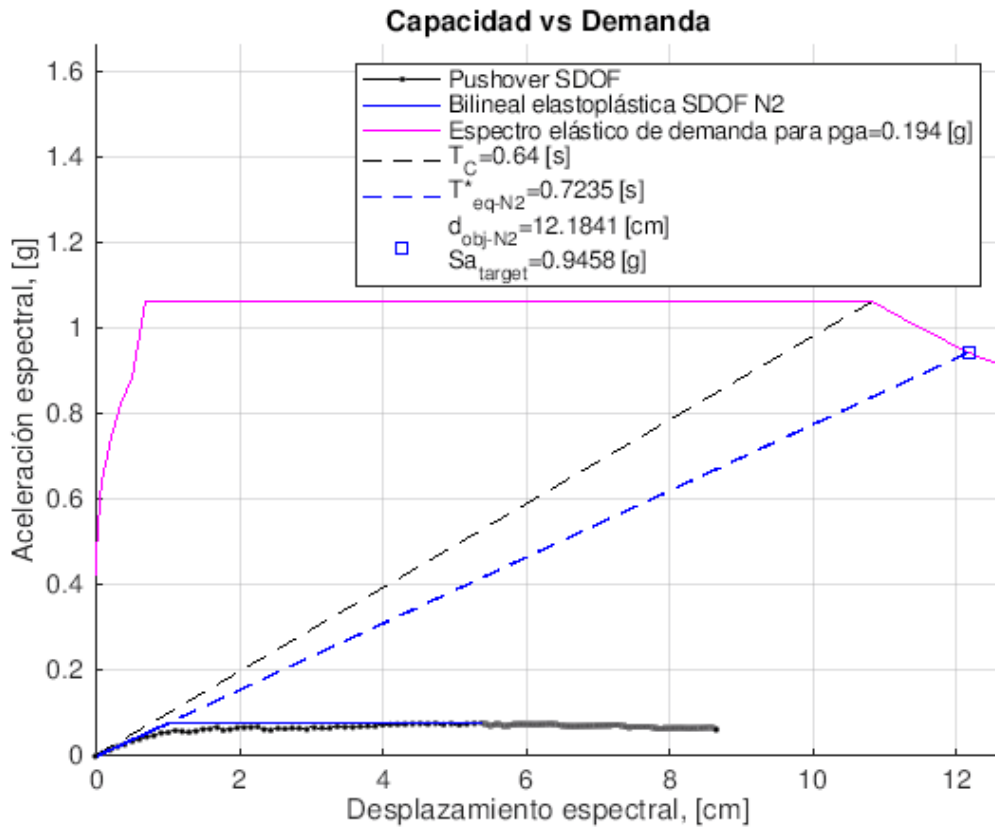


Figura A1.5. Capacidad frente a demanda con $pga=0,194g$ en el Edificio 1 en el eje X negativo
(Fuente: Propia)

- **Dirección en el eje Y sentido Positivo**

Se presenta el análisis en el eje Y en sentido positivo para el Edificio 1 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 2.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 1 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

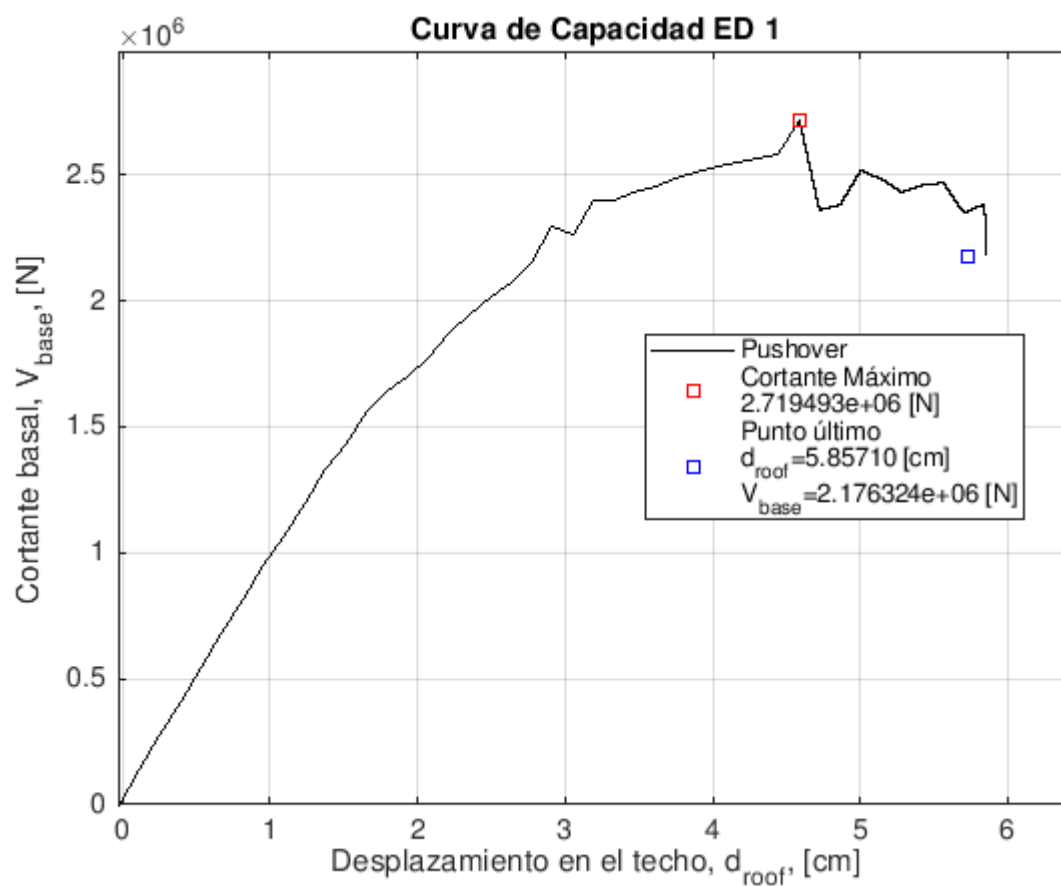


Figura A1.6. Curva de capacidad del Edificio 1 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

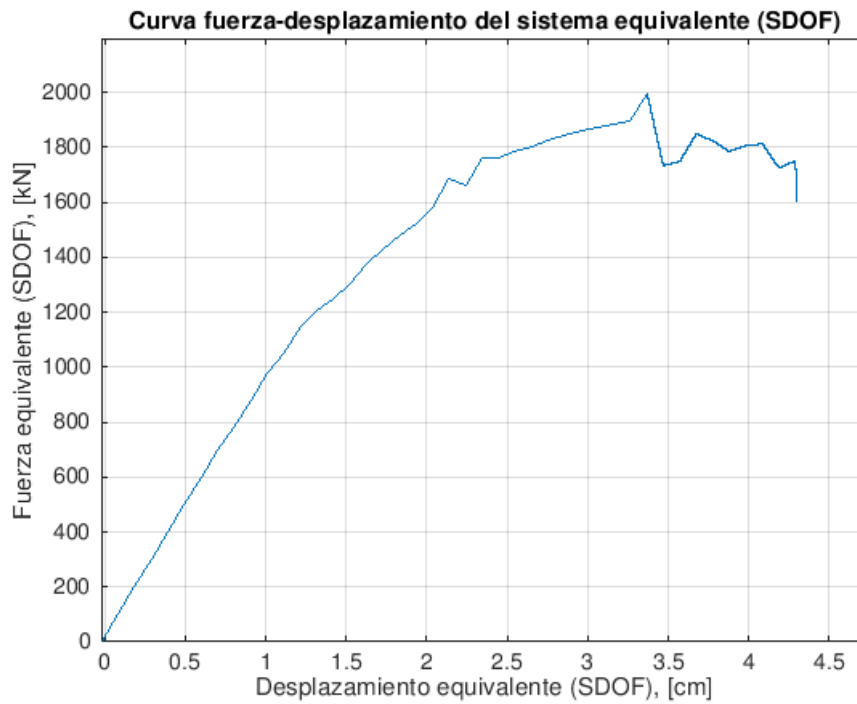


Figura A1.7. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 1 en el eje Y positivo (Fuente: Propia)

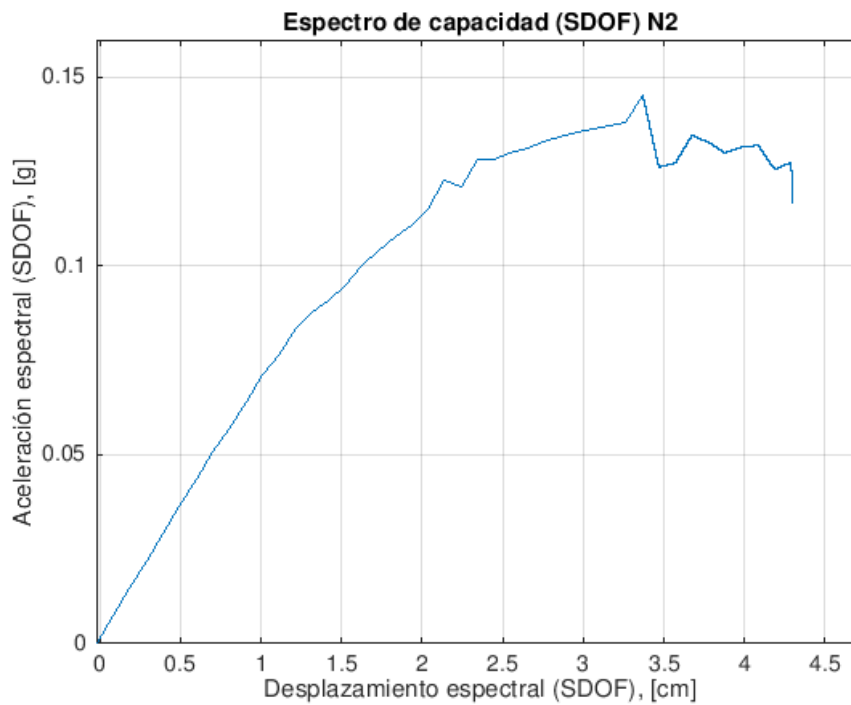


Figura A1.8. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 1 en el eje Y positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

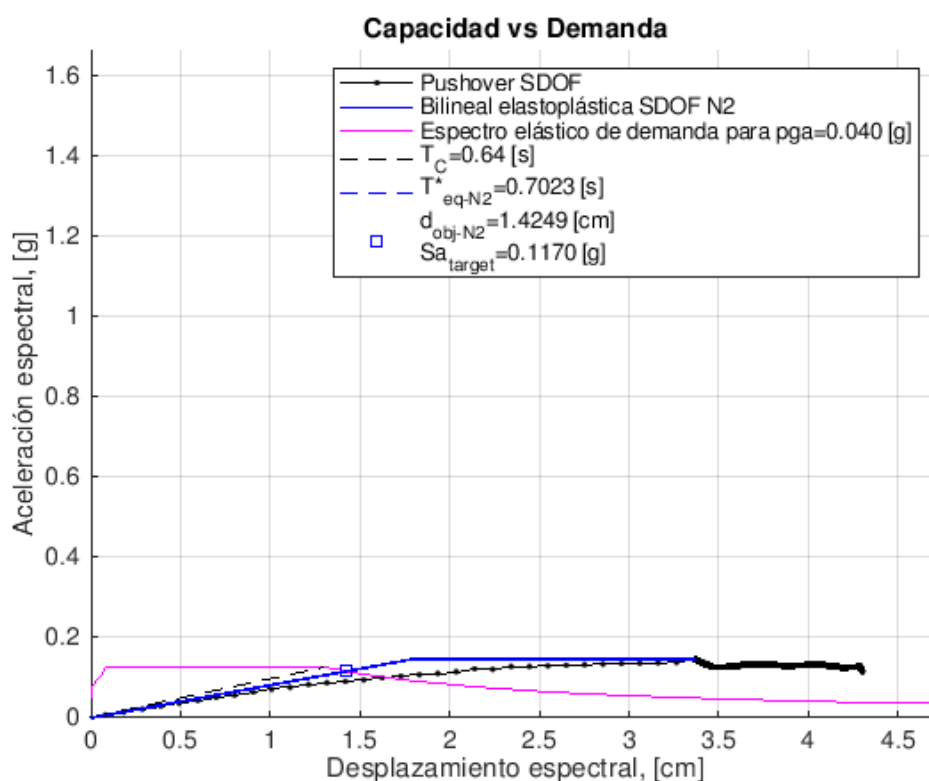


Figura A1.9. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ del Edificio 1 en el eje Y positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

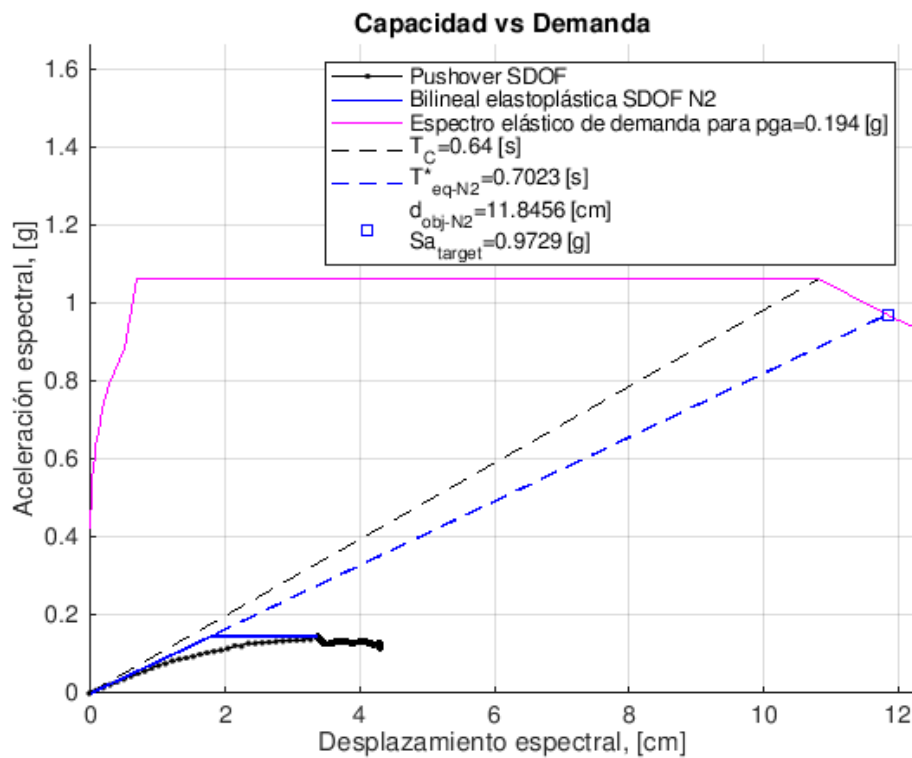


Figura A1.10. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0.194$ g del Edificio 1 en el eje Y positivo (Fuente: Propia)

- Direcció en el eix Y sentit Negatiu

Se presenta el anàlisi en el eix Y en sentit negatiu per al Edificio 1 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 2.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 1 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

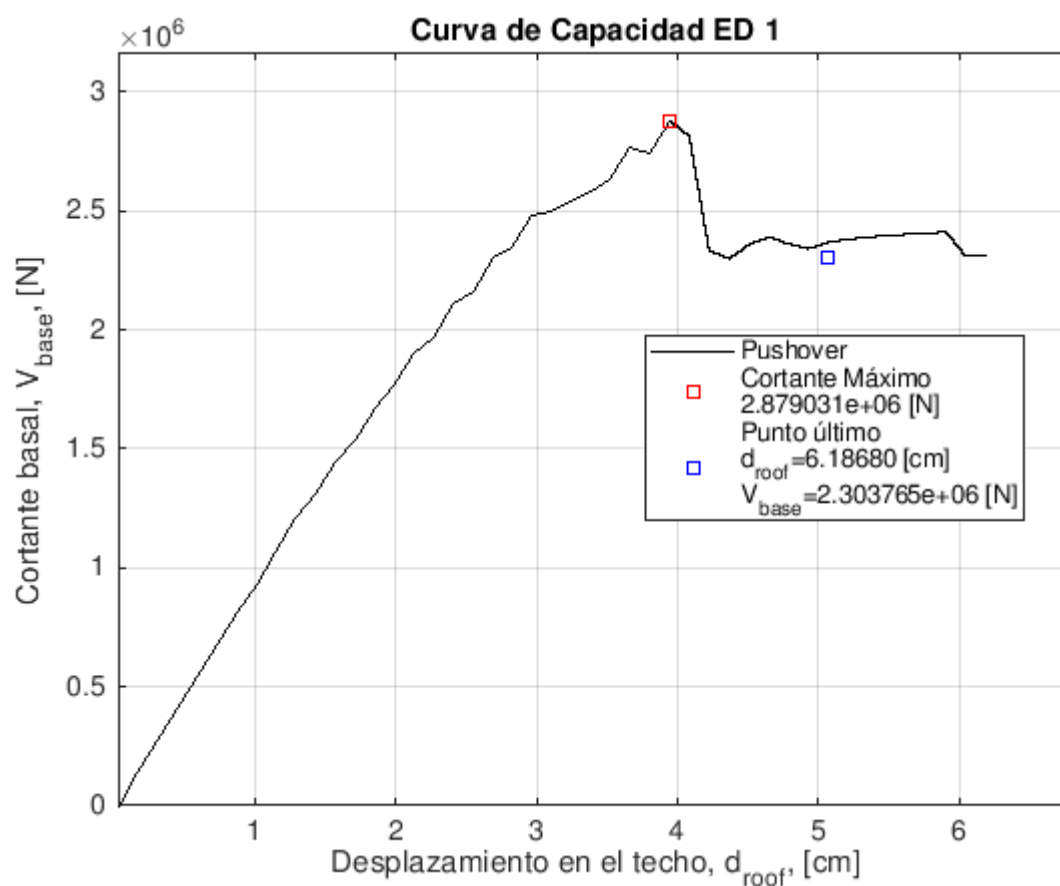


Figura A1.11. Curva de capacidad del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

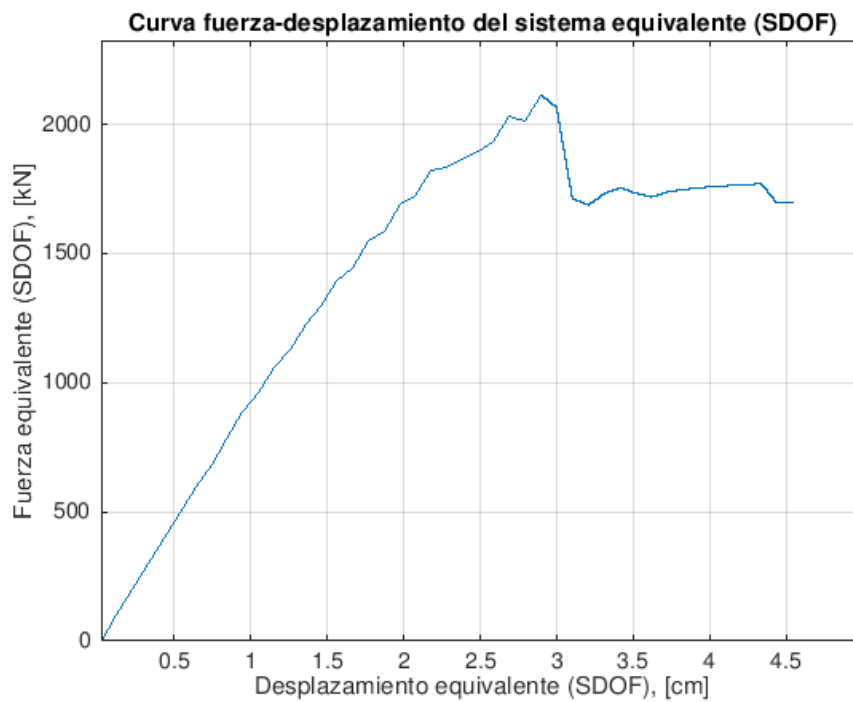


Figura A1.12. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

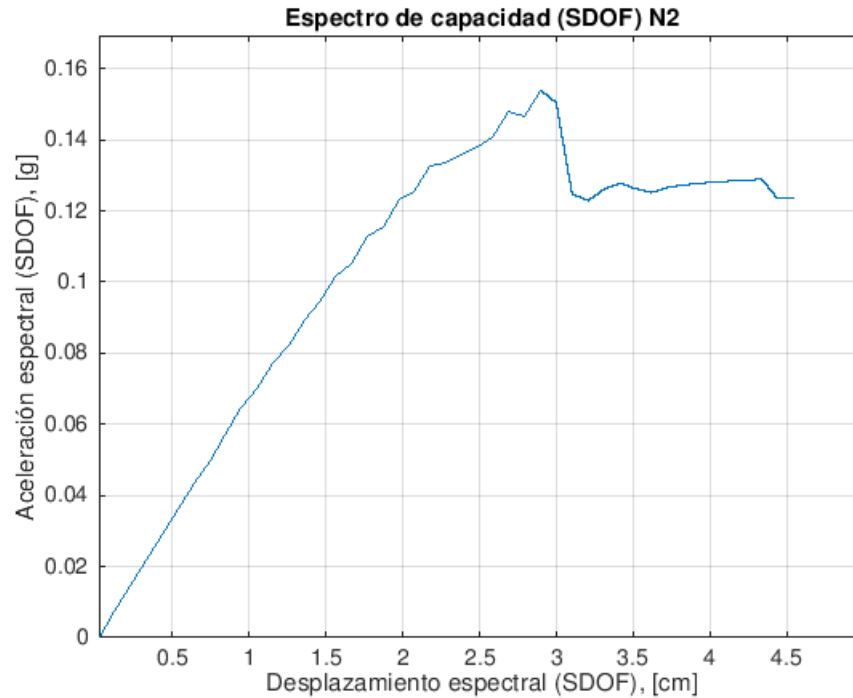


Figura A1.13. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

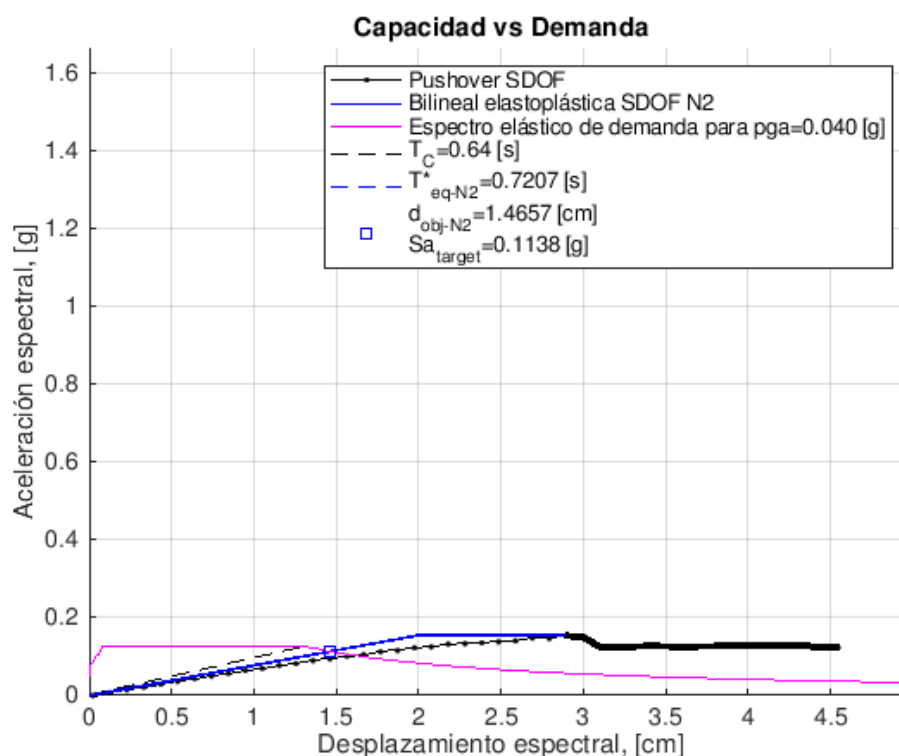


Figura A1.14. Capacidad frente a demanda con pga=0,04g del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

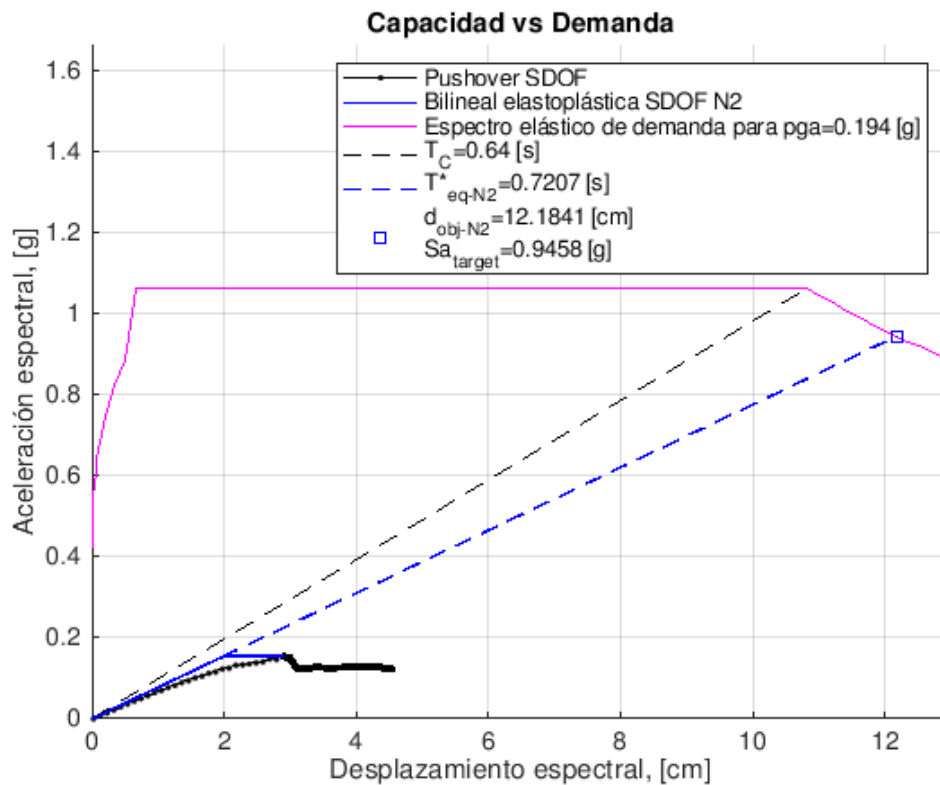


Figura A1.15. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Edificio 1 en el eje Y negativo
(Fuente: Propia)

A2. Representación gráfica de los resultados del Análisis estático no lineal en el Edificio 2 aislado

- Dirección en el eje X sentido Negativo

Se presenta el análisis en el eje X en sentido negativo para el Edificio 2 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 1.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 2 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

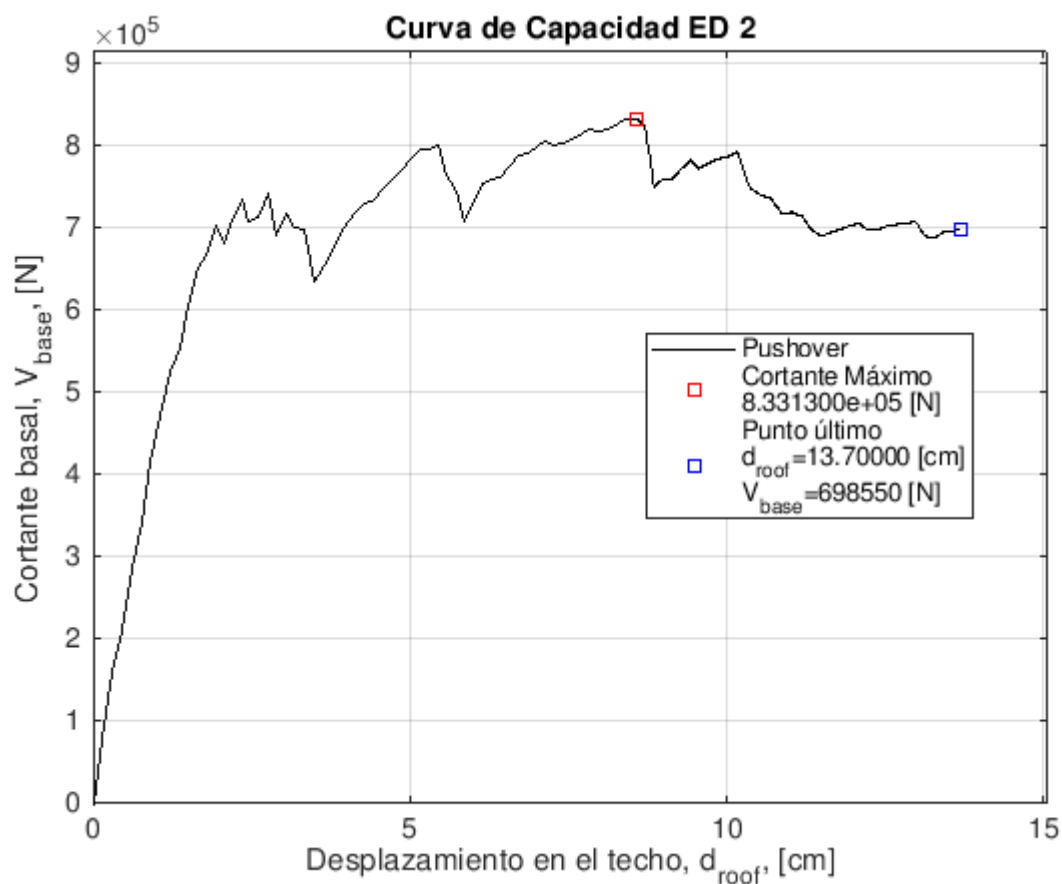


Figura A2.1. Curva de capacidad del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

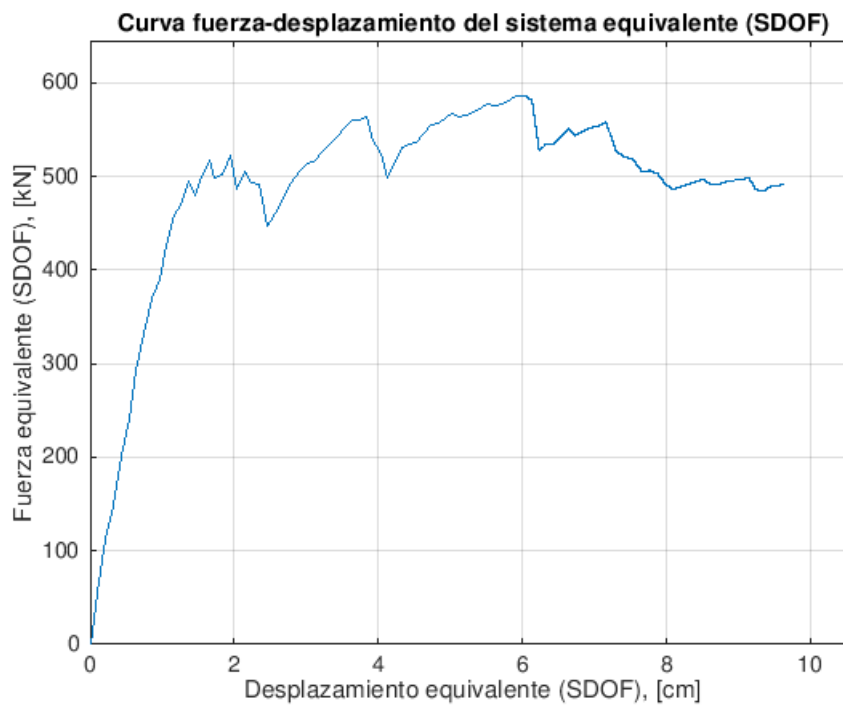


Figura A2.2. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

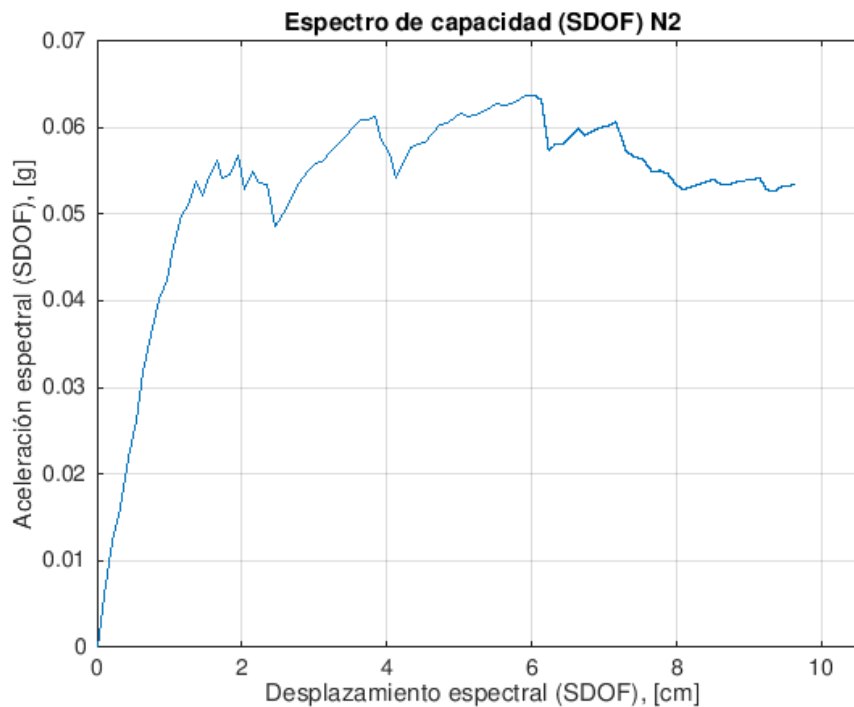


Figura A2.3. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

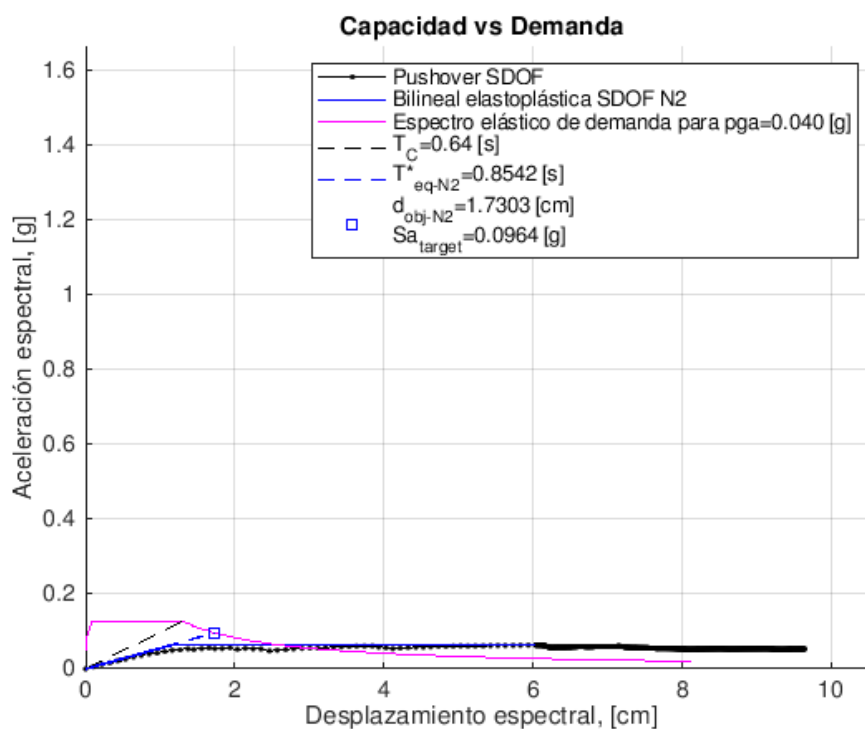


Figura A2.4. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

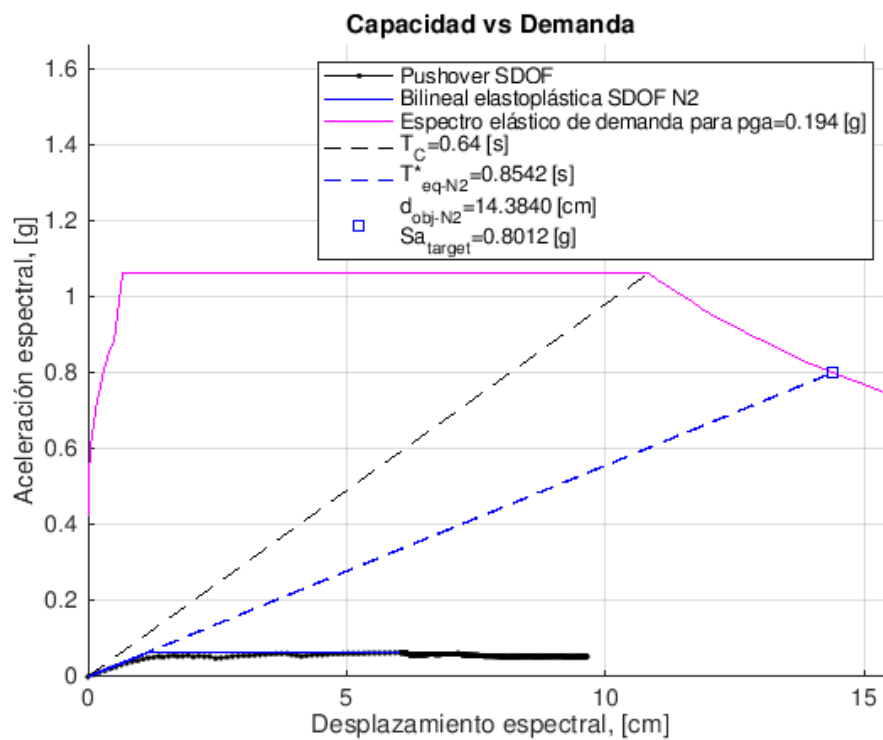


Figura A2.5. Capacidad frente a demanda con pga=0,194g del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

- **Dirección en el eje Y sentido Positivo**

Se presenta el análisis en el eje Y en sentido positivo para el Edificio 2 cuando se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 1.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 2 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

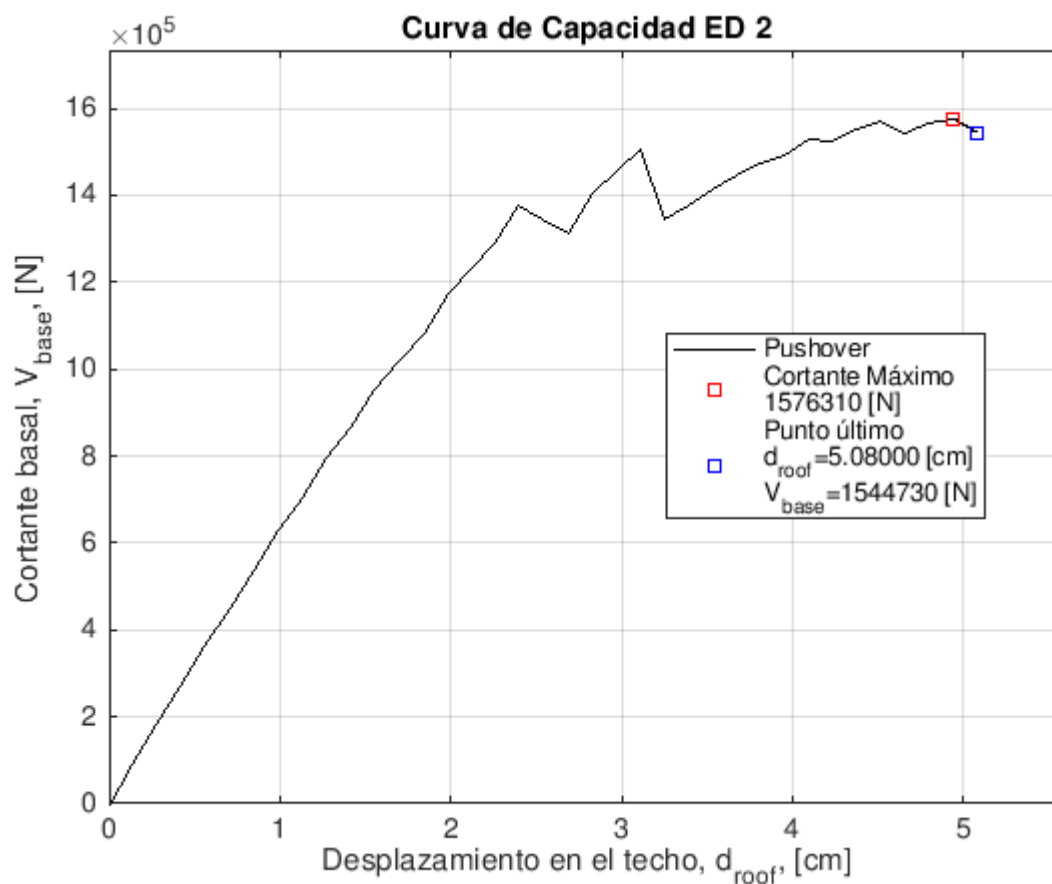


Figura A2.6. Curva de capacidad del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

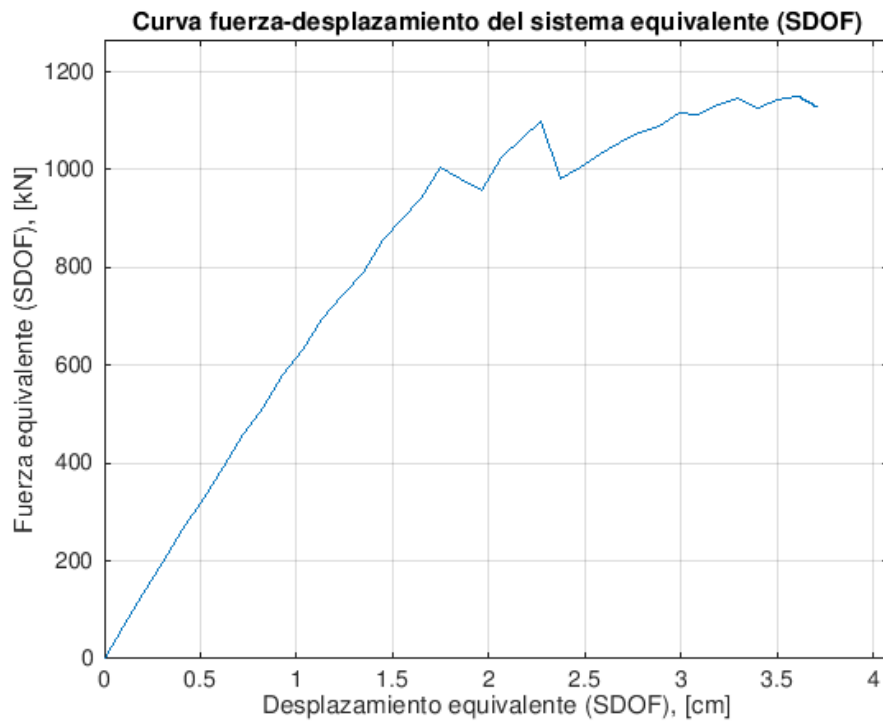


Figura A2.7. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

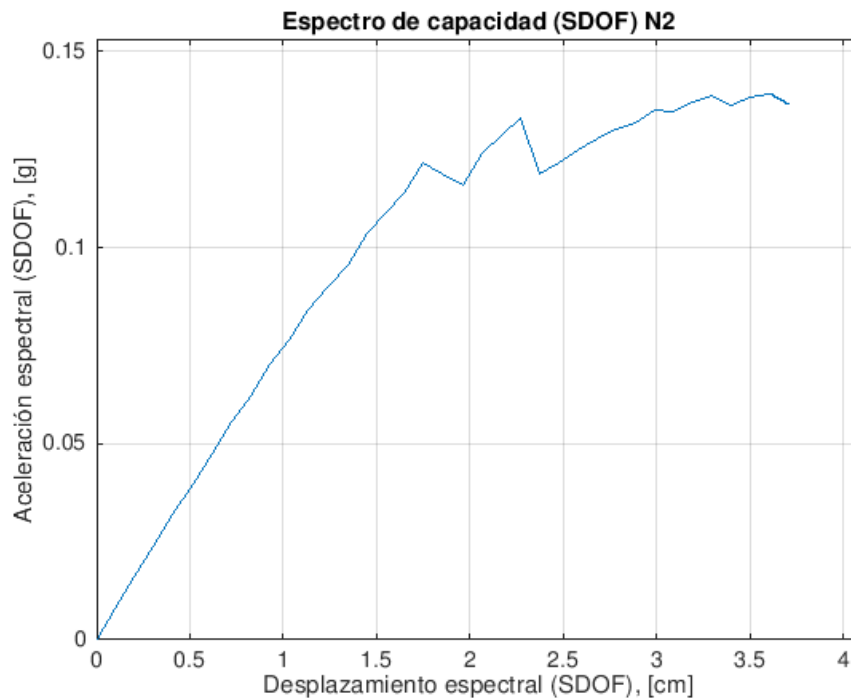


Figura A2.8. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

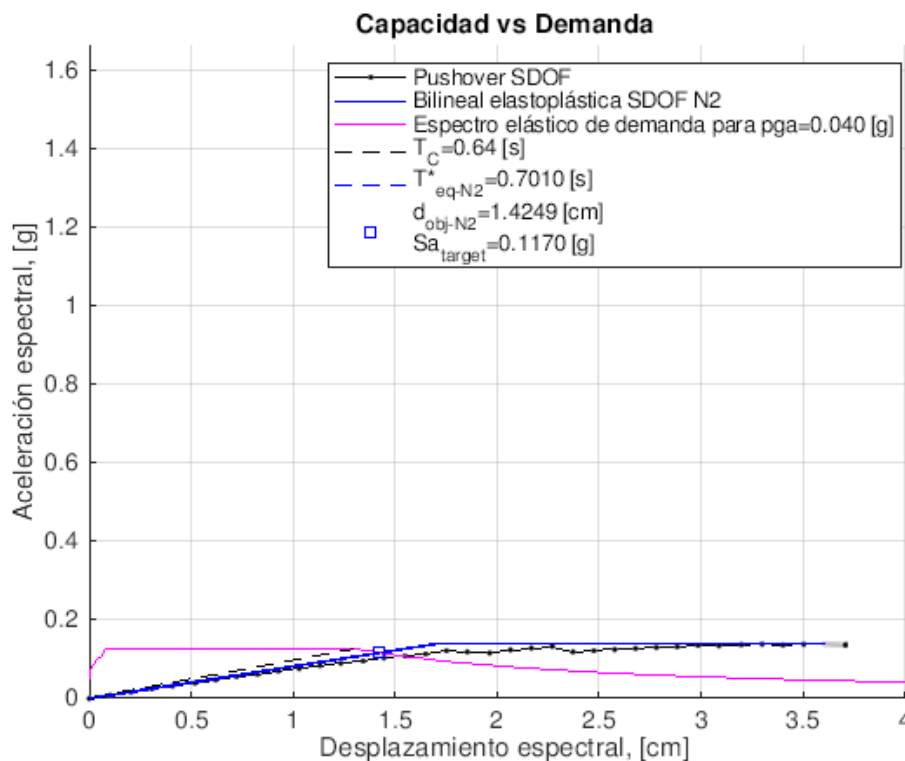


Figura A2.9. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

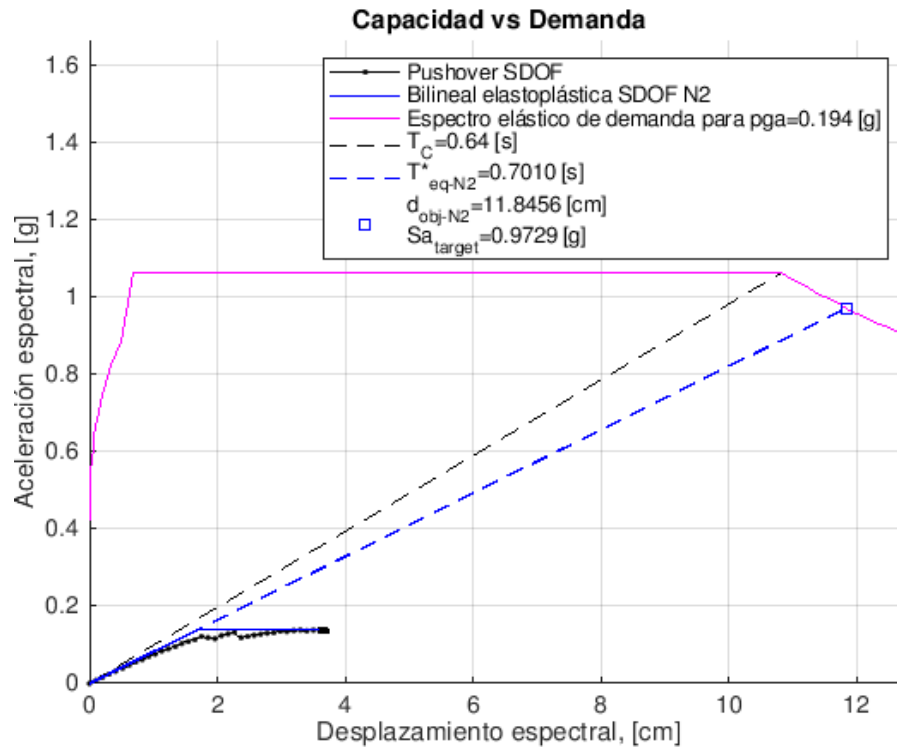


Figura A2.10. Capacitat frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

- Direcció en el eix Y sentit Negatiu

Se presenta el anàlisis en el eix Y en sentit negatiu per al Edifici 2 quan se encuentra aislado, es decir, en el caso que no comparte pared medianera con el Edificio 1.

Se obtiene la curva de capacidad en el Edificio 2 a partir de la simulación con el programa Tremuri.

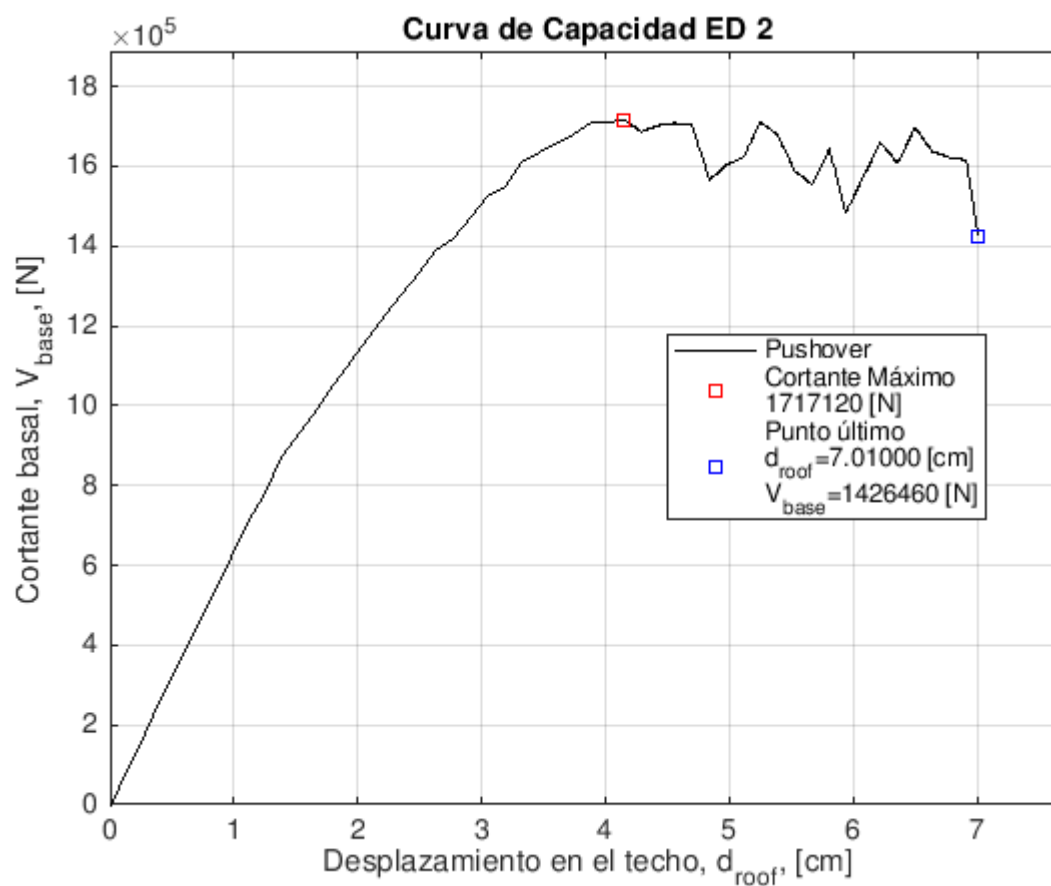


Figura A2.11. Curva de capacidad del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

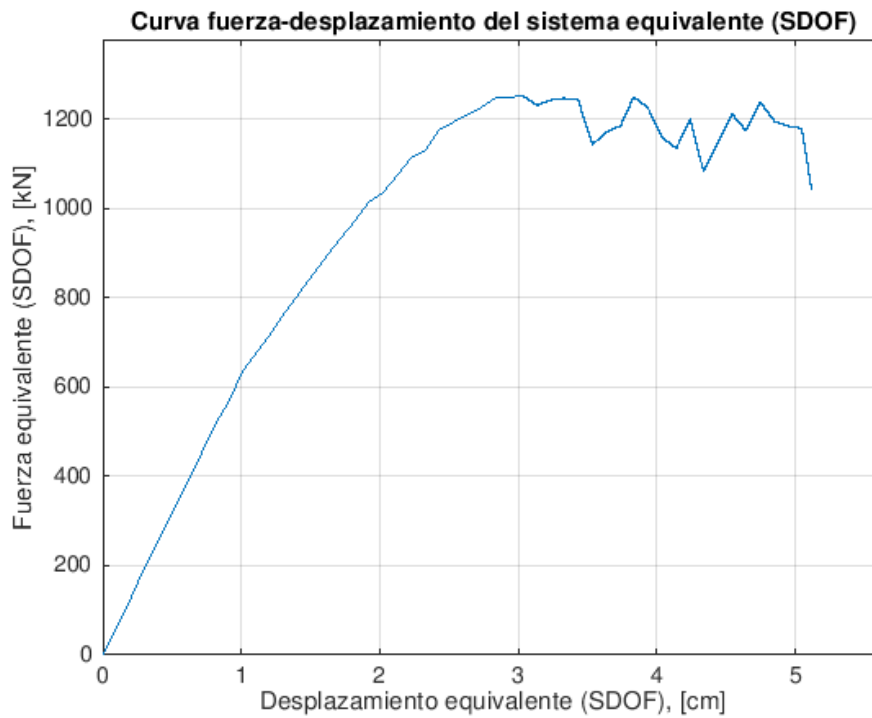


Figura A2.12. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

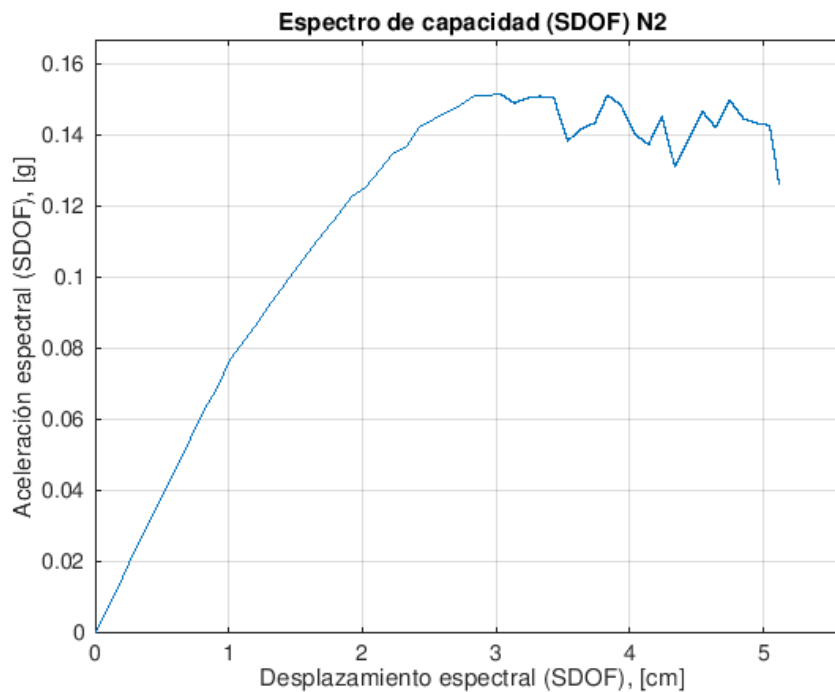


Figura A2.13. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

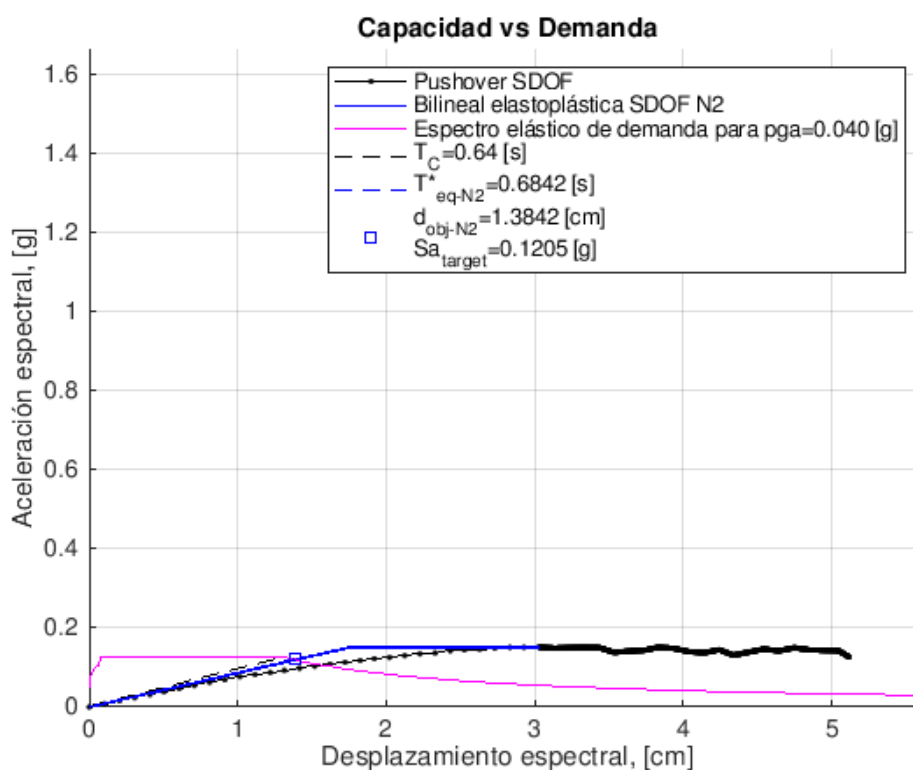


Figura A2.14. Capacidad frente a demanda con pga=0,04g del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

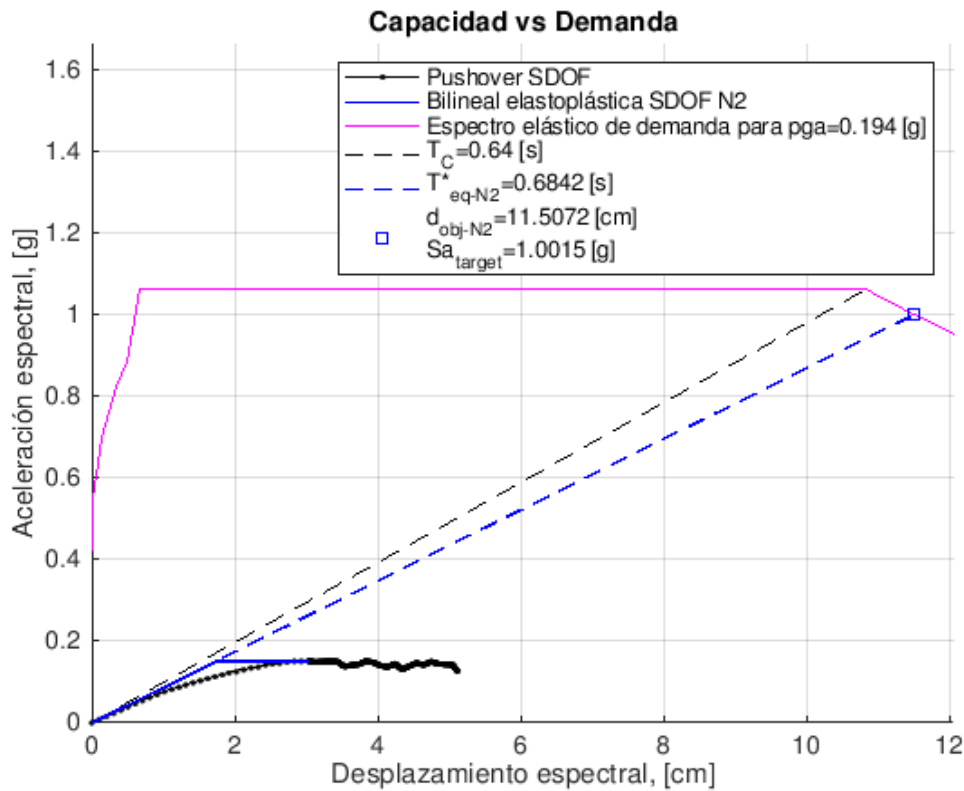


Figura A2.15. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

A3. Representación gráfica de los resultados del Análisis estático no lineal en el Agregado

- Dirección en el eje X sentido Negativo

Se presenta el análisis en el eje X en sentido negativo para el Edificio 1 y el Edificio 2 compartiendo pared medianera, es decir, cuando los dos edificios están agregados.

Se obtiene la curva de capacidad para el agregado de edificios a partir de la simulación con el programa Tremuri.

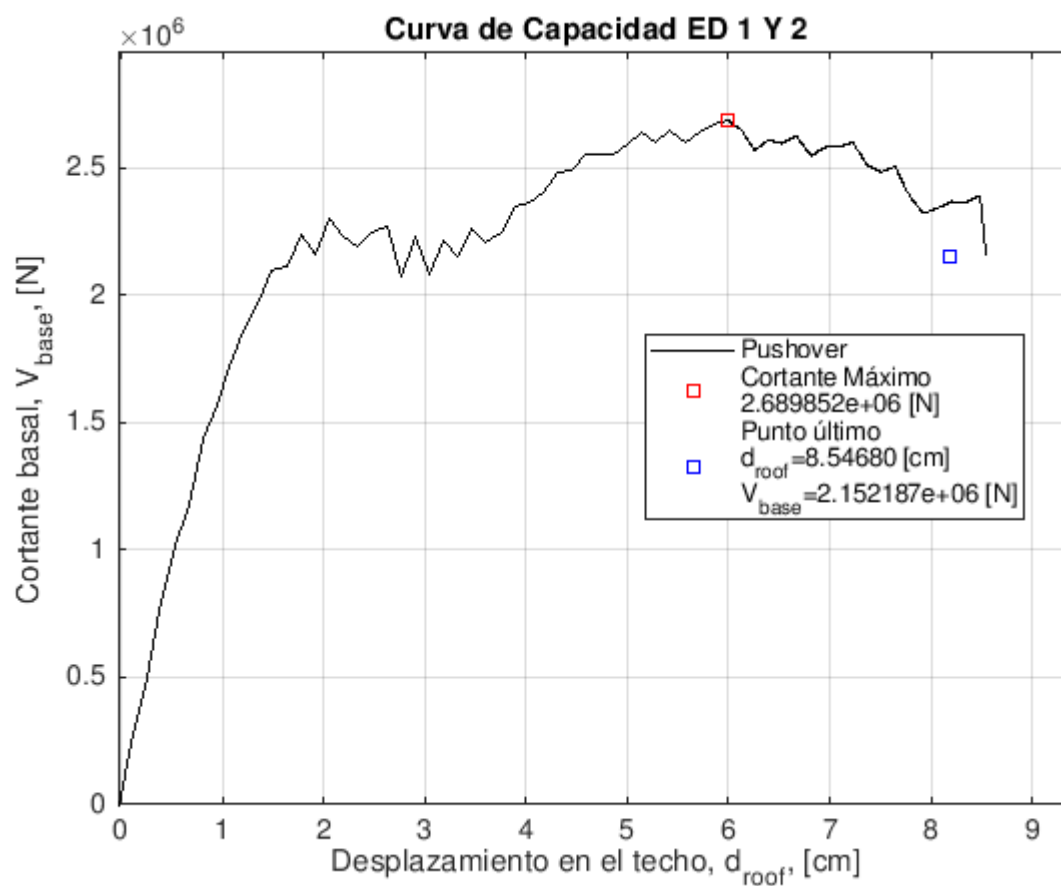


Figura A3.1. Curva de capacidad del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

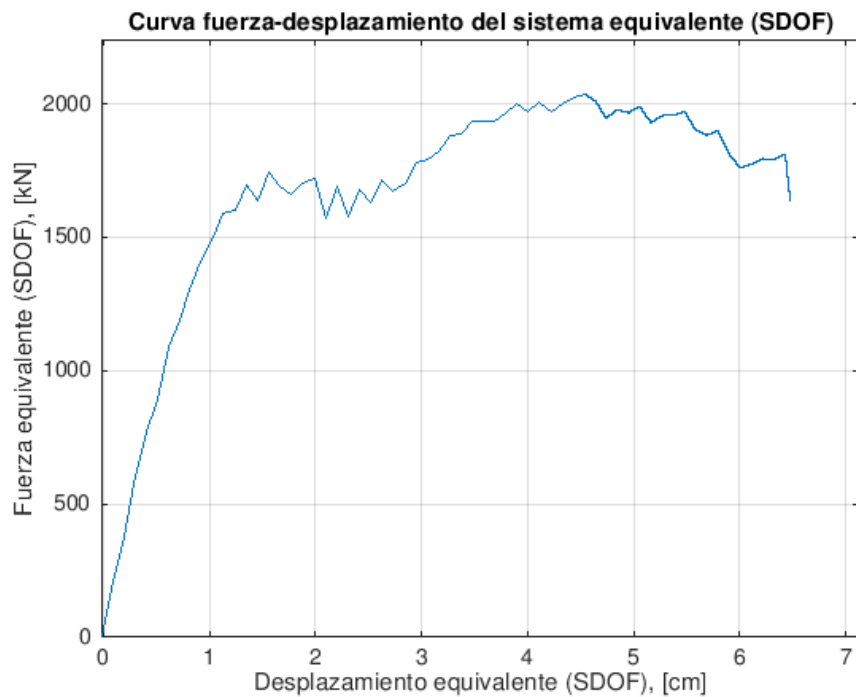


Figura A3.2. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

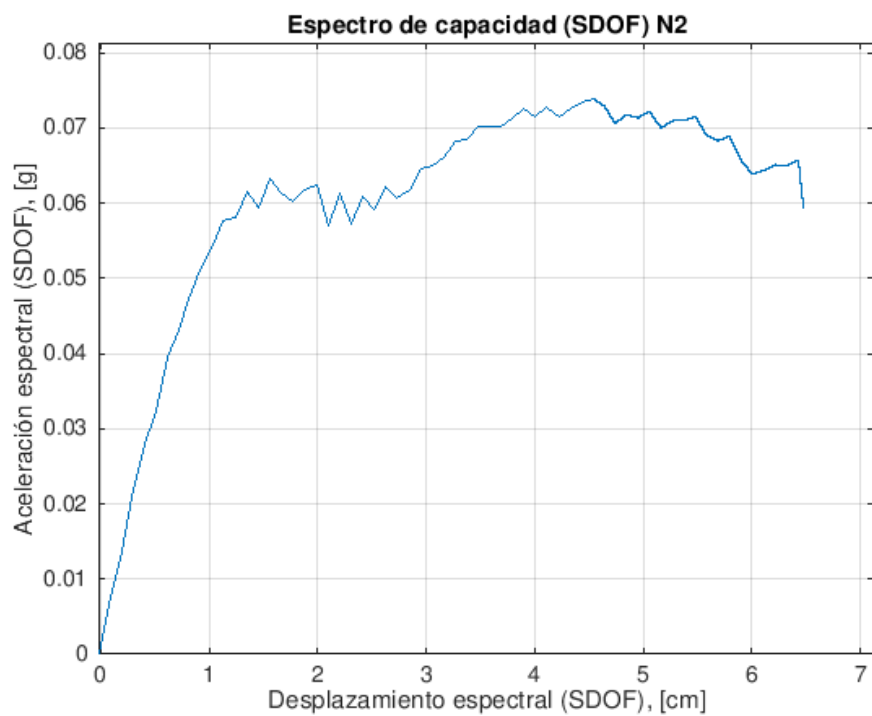


Figura A3.3. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

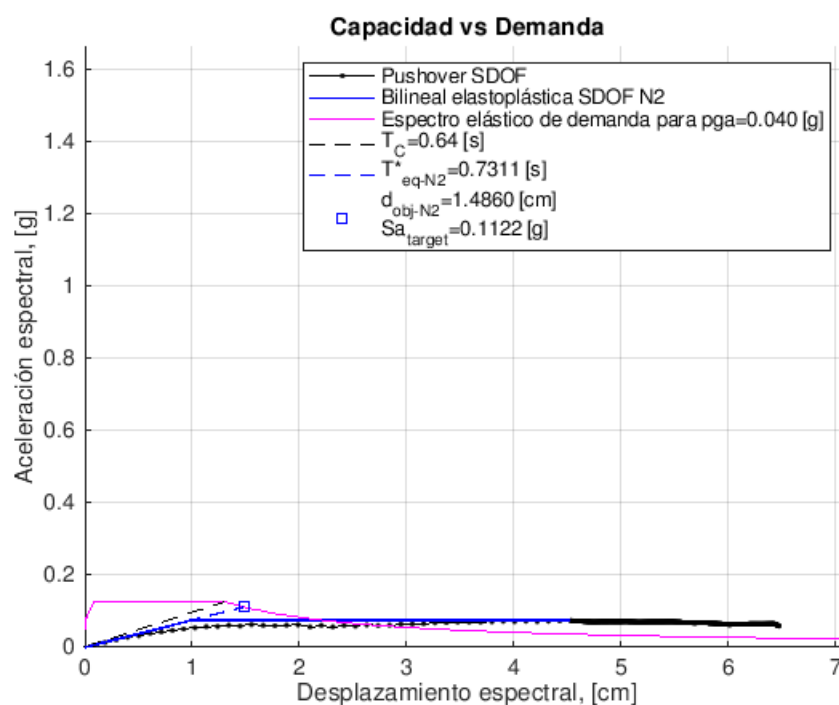


Figura A3.4. Capacidad frente a demanda con pga=0,04g del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

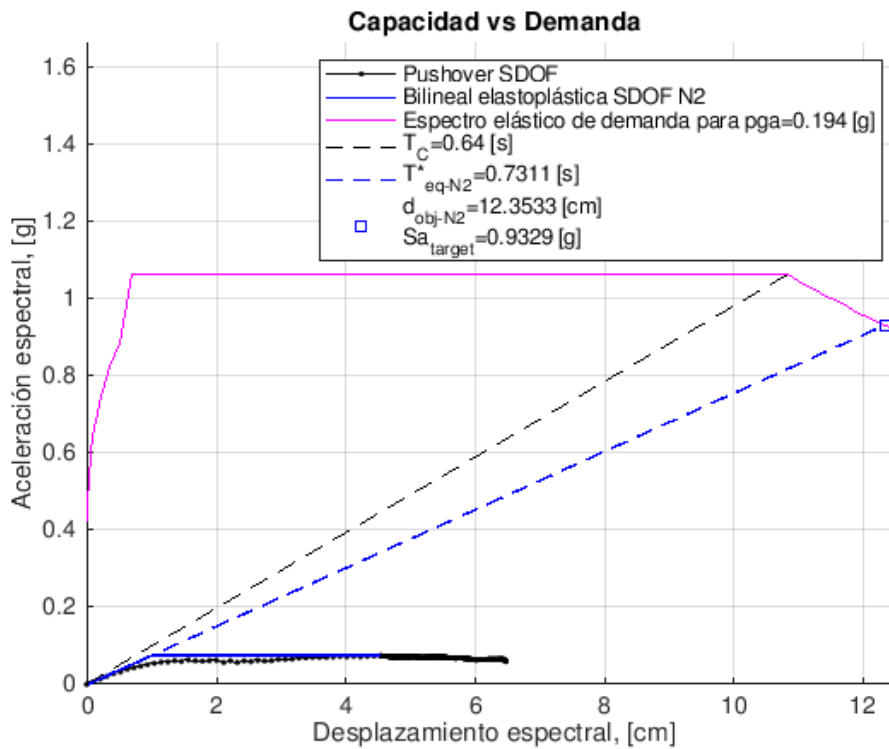


Figura A3.5. Capacitat frente a demanda con $p_{ga}=0.194g$ del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

- Direcció en el eje Y sentido Positivo

Se presenta el análisis en el eje Y en sentido positivo para el Edificio 1 y el Edificio 2 compartiendo pared medianera, es decir, cuando los dos edificios están agregados.

Se obtiene la curva de capacidad para el agregado de edificios a partir de la simulación con el programa Tremuri.

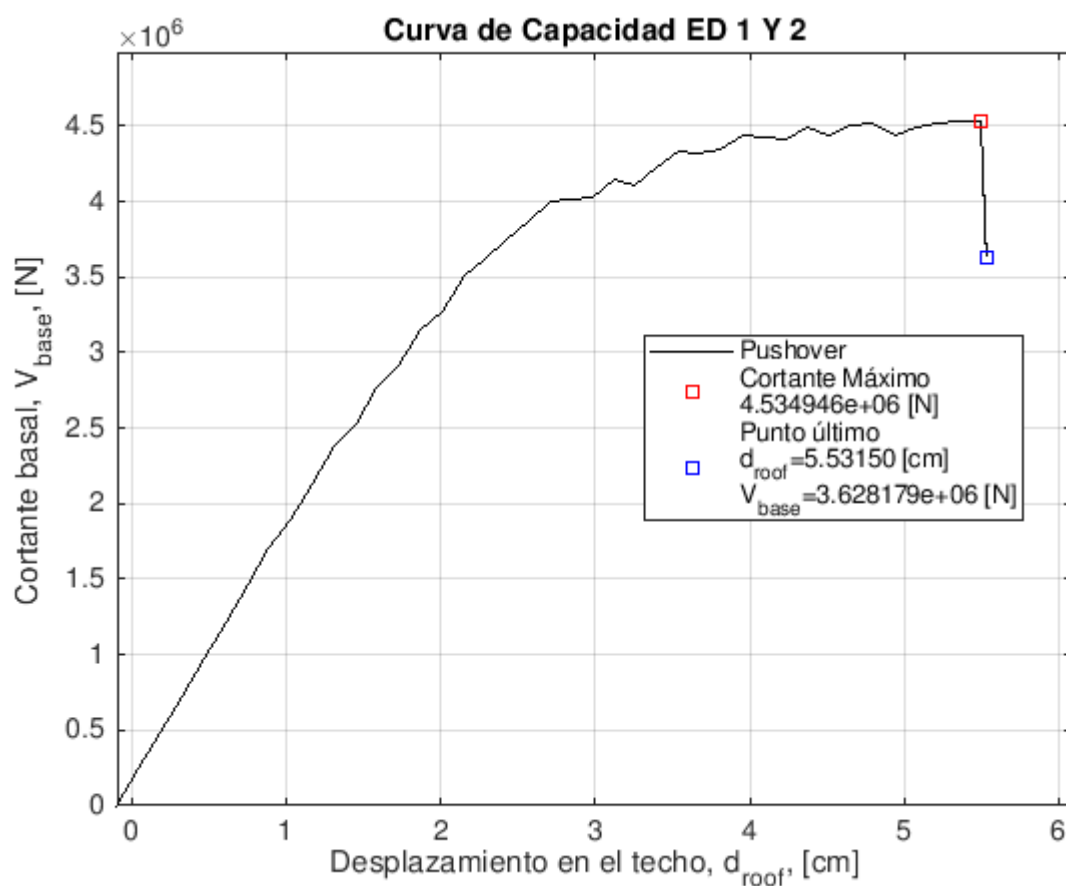


Figura A3.6. Curva de capacidad del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

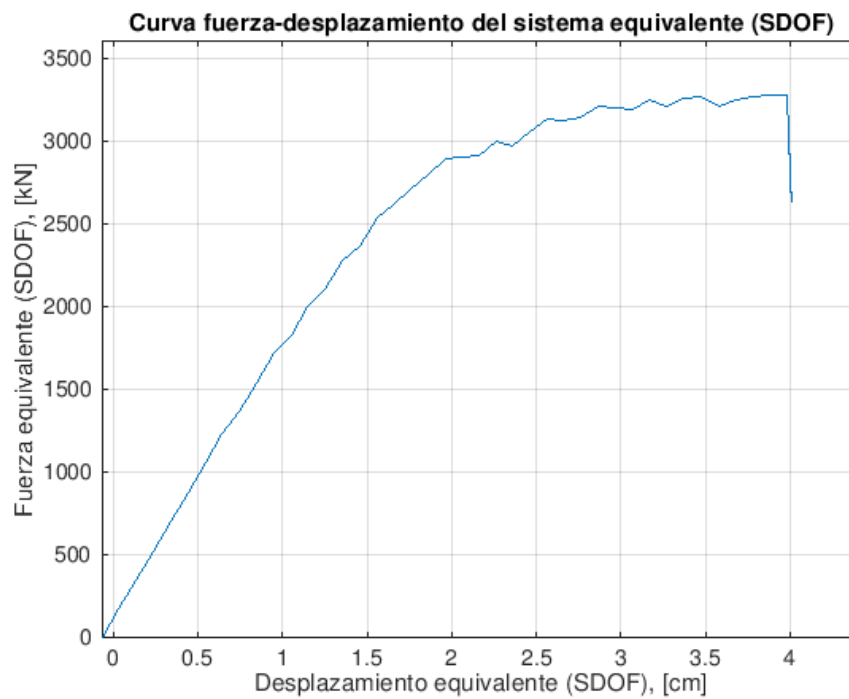


Figura A3.7. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

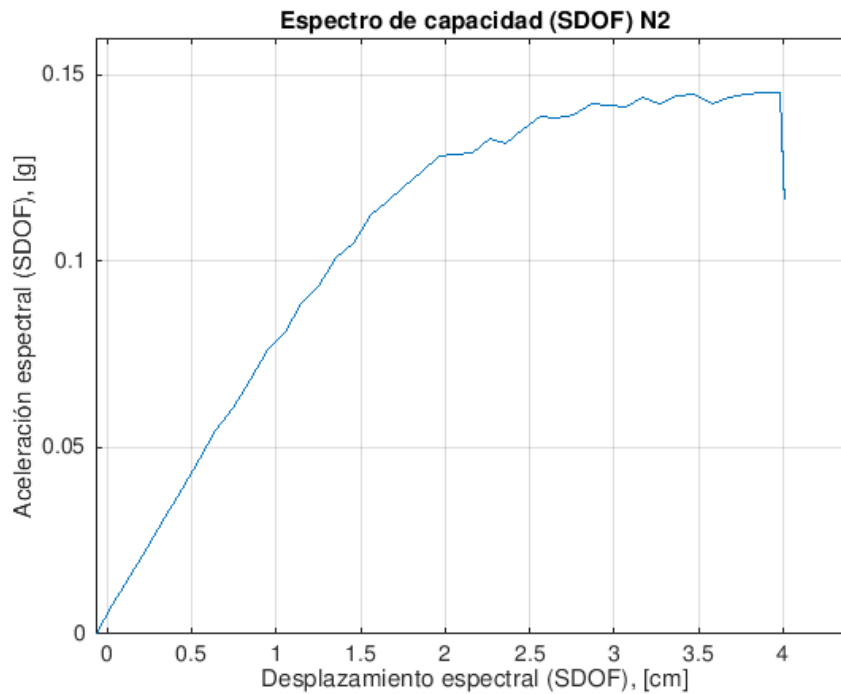


Figura A3.8. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

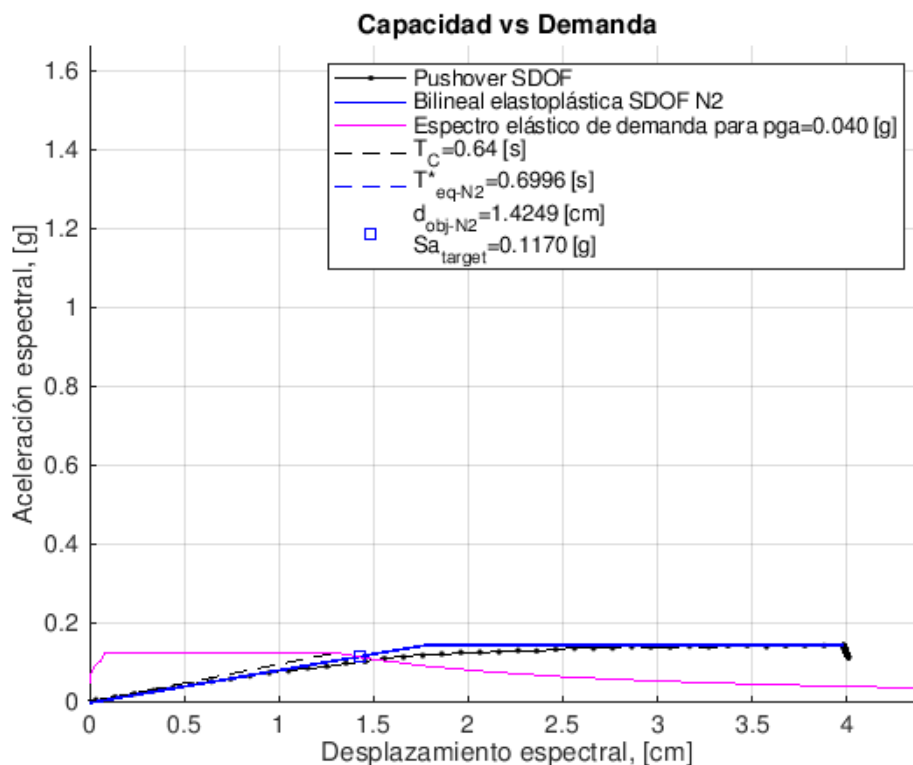


Figura A3.9. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona.

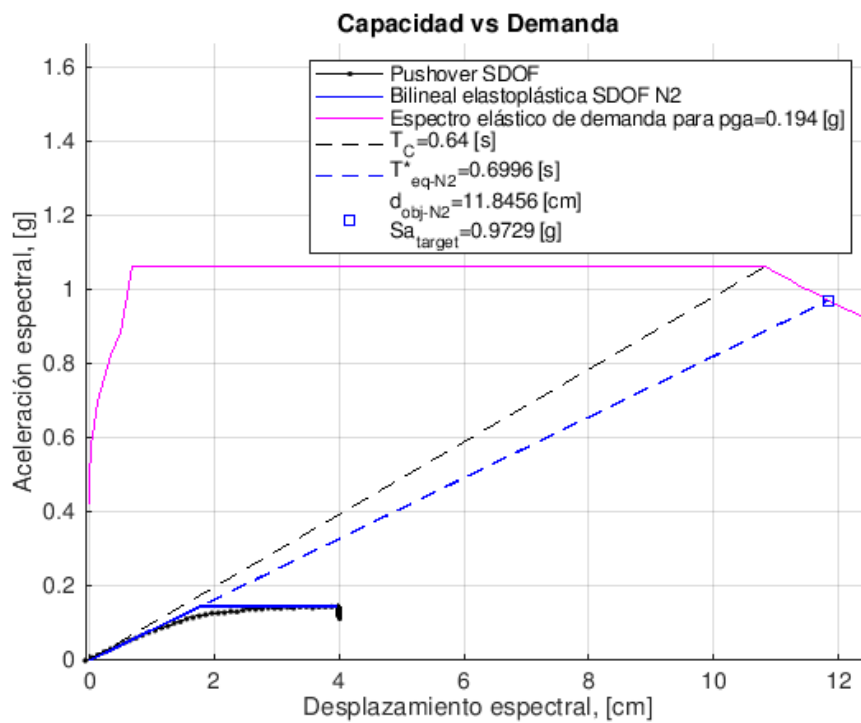


Figura A3.10. Capacitat frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

- Direcció en el eje Y sentido Negativo

Se presenta el análisis en el eje Y en sentido negativo para el Edificio 1 y el Edificio 2 compartiendo pared medianera, es decir, cuando los dos edificios están agregados.

Se obtiene la curva de capacidad para el agregado de edificios a partir de la simulación con el programa Tremuri.

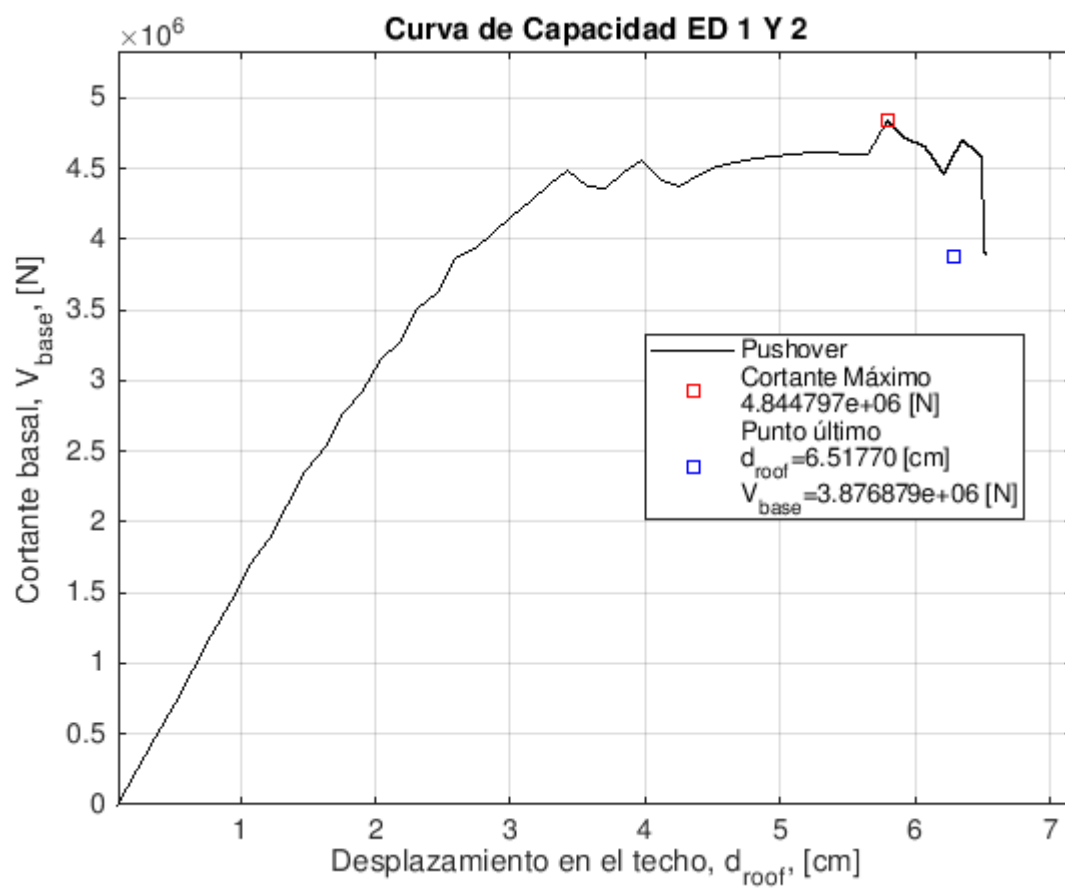


Figura A3.11. Curva de capacidad del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se transforma la curva de capacidad en espectro de capacidad del sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF).

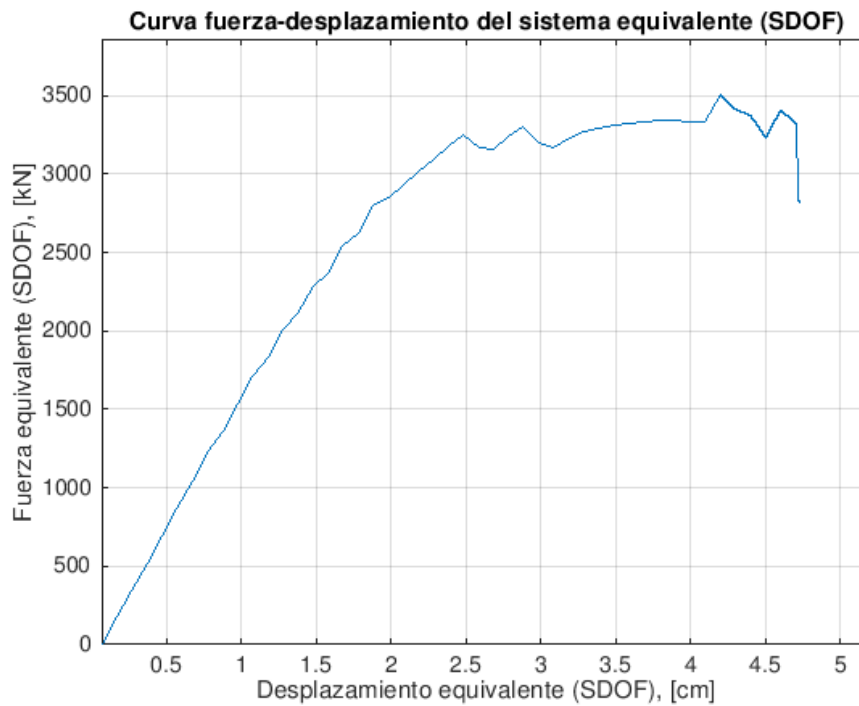


Figura A3.12. Curva de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

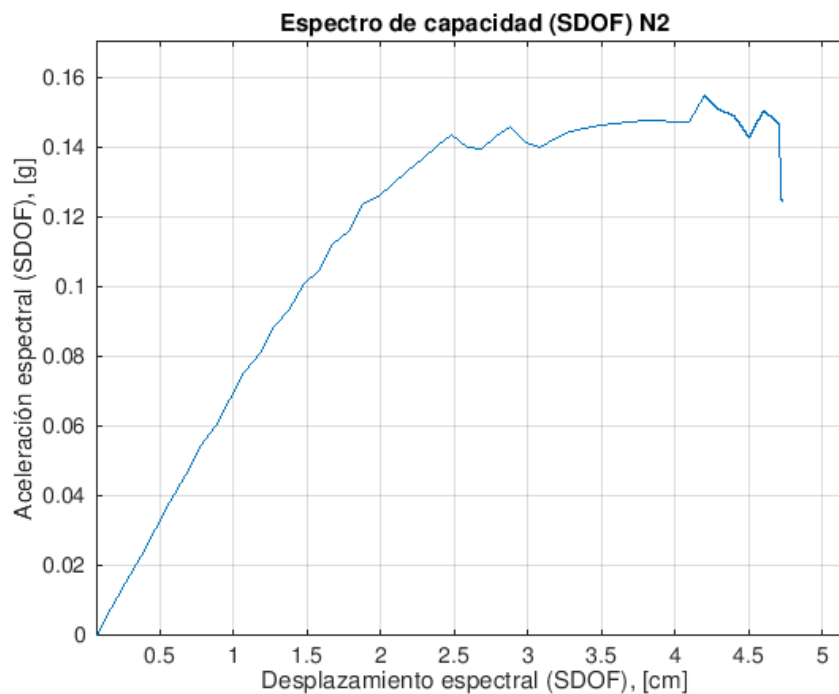


Figura A3.13. Espectro de capacidad del sistema equivalente con un grado de libertad del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,04g según define la normativa NCSE-02 para la zona del Eixample.

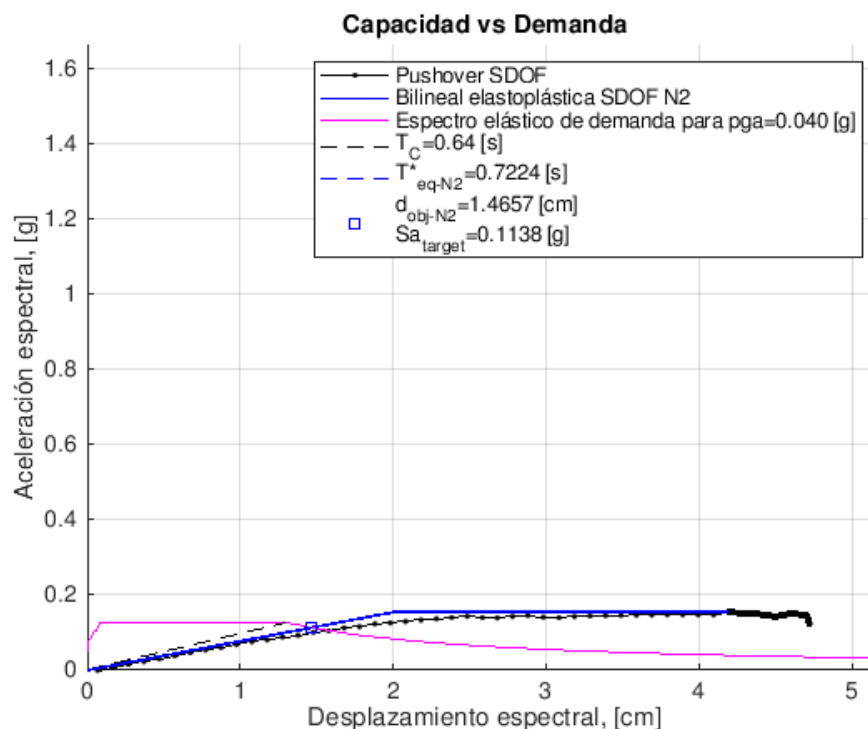


Figura A3.14. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,04g$ del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se enfrentan el espectro de capacidad y la curva de demanda para una aceleración pico del terreno (pga) de 0,194g, un valor aproximadamente cinco veces mayor de lo marcado por la Norma NCSE-02, de acuerdo a los valores propuestos en el estudio de microzonación para la zona del Eixample en la ciudad de Barcelona..

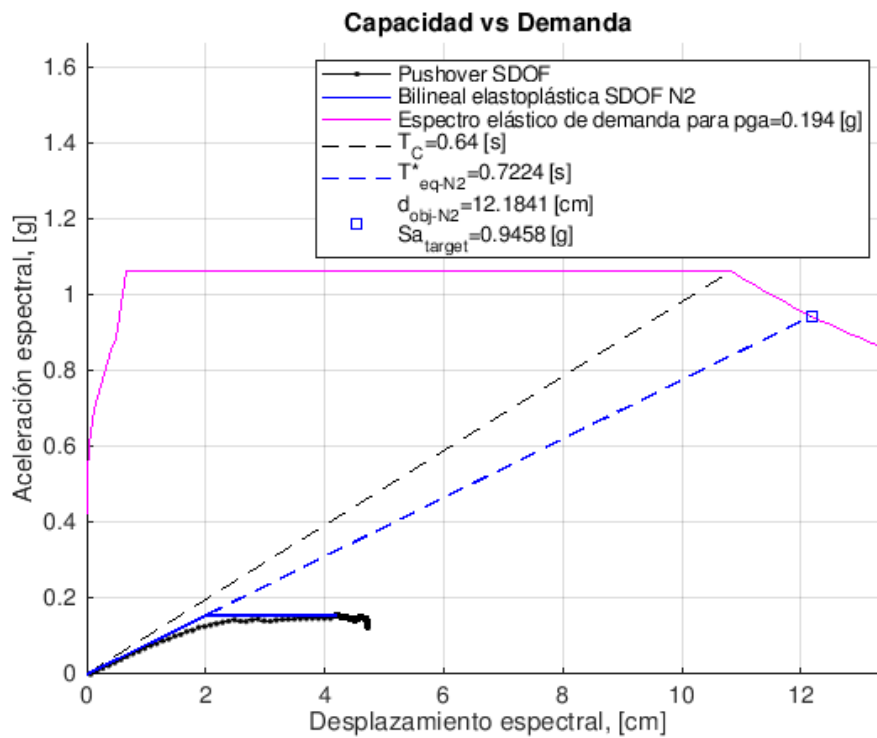


Figura A3.15. Capacidad frente a demanda con $p_{ga}=0,194g$ del Agregado en el eje Y Negativo
(Fuente: Propia)

A4. Gráficas de los resultados de Fragilidad en el Edificio 1 aislado

- Dirección en el eje X sentido Negativo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje X en sentido Negativo.

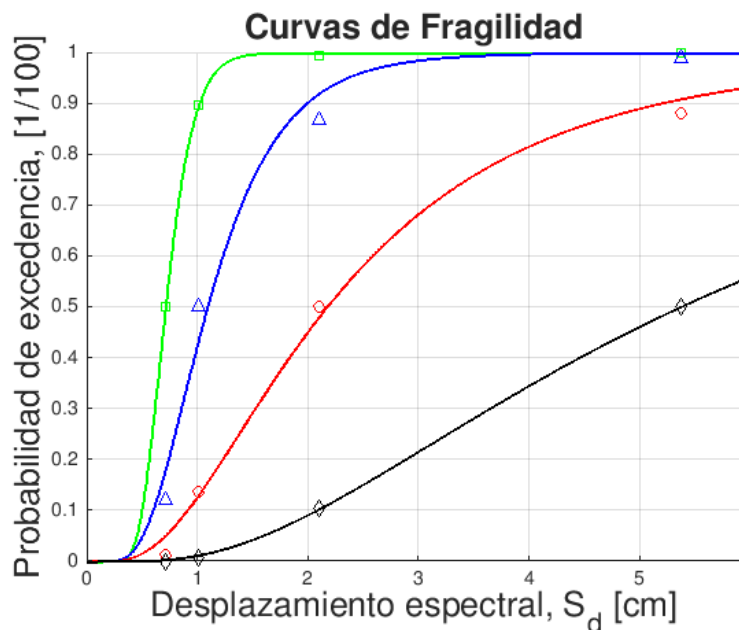


Figura A4.1. Curvas de fragilidad del Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

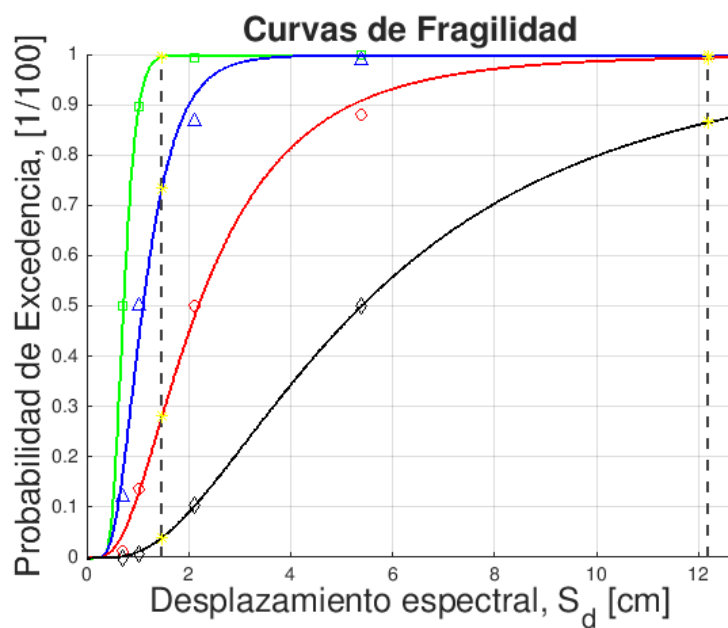


Figura A4.2. Curva de fragilidad del Edificio 1 en el eje X Negativo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

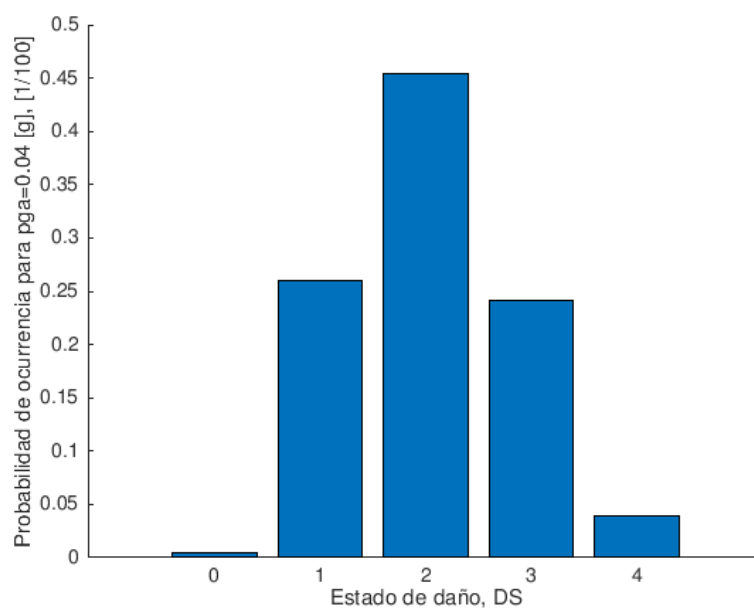


Figura A4.3. Estado de daño con $p_{ga}=0.04$ g del Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

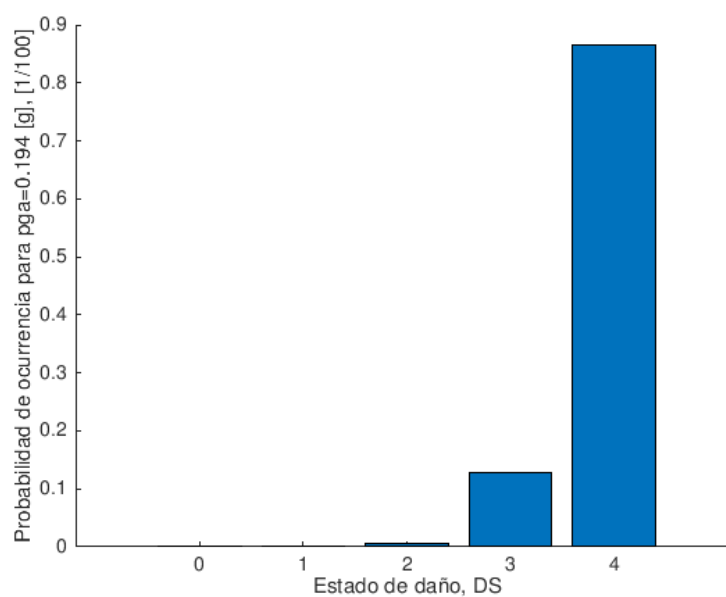


Figura A4.4. Estado de daño con $p_{ga}=0.194$ g del Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.



Figura A4.5. Índice de daño del Edificio 1 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

- **Dirección en el eje Y sentido Positivo**

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje Y en sentido Positivo.

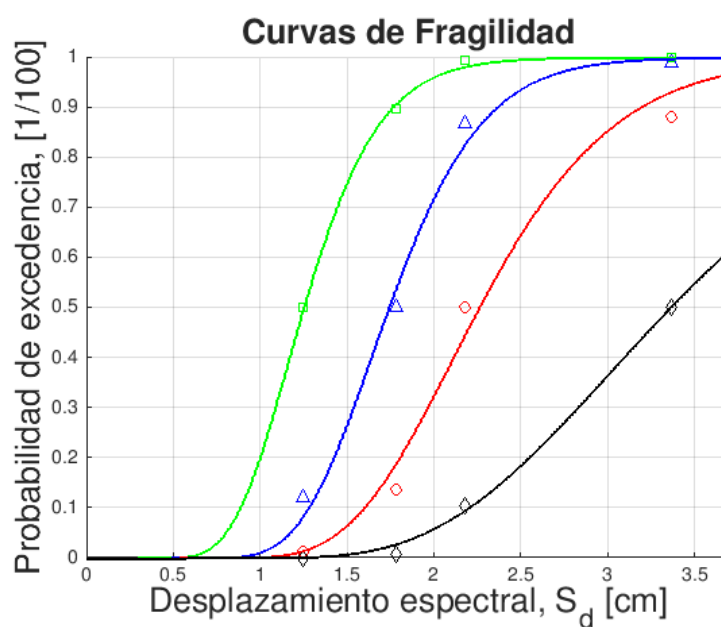


Figura A4.6. Curvas de fragilidad del Edificio 1 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

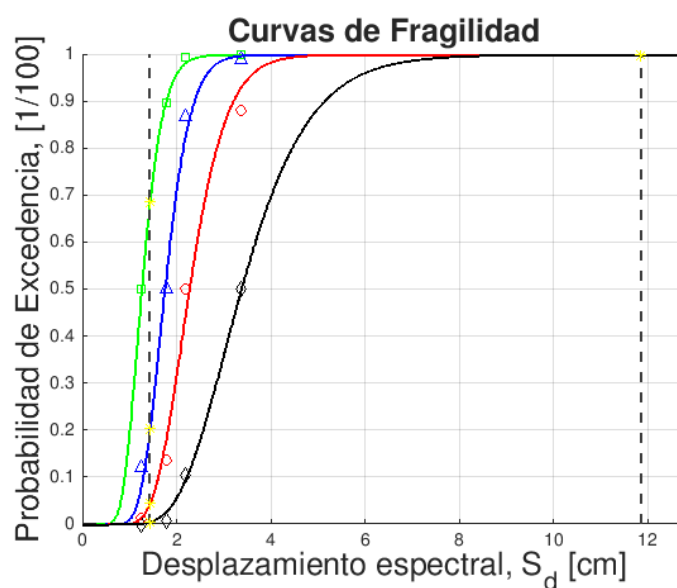


Figura A4.7. Curva de fragilidad del Edificio 1 en el eje Y Positivo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

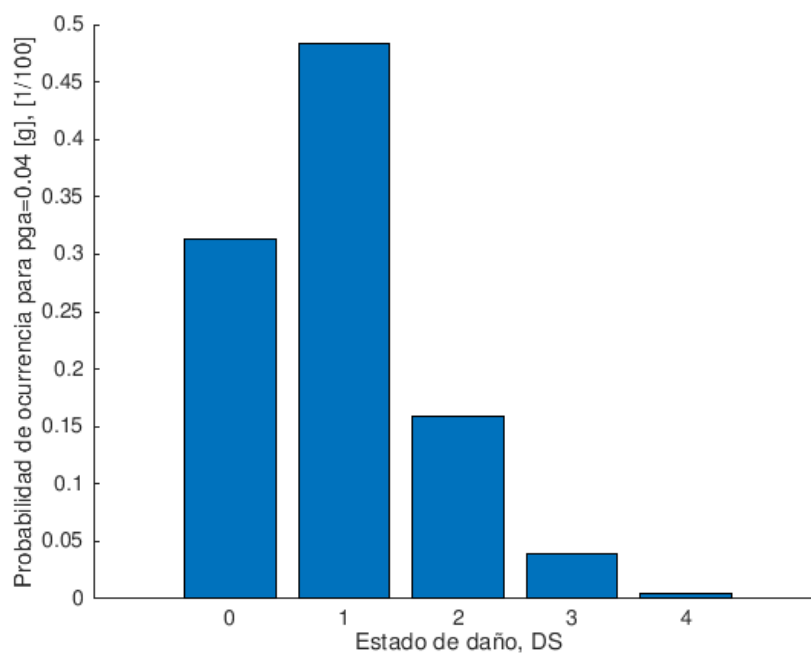


Figura A4.8. Estado de daño con $p_{ga}=0.04$ g del Edificio 1 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

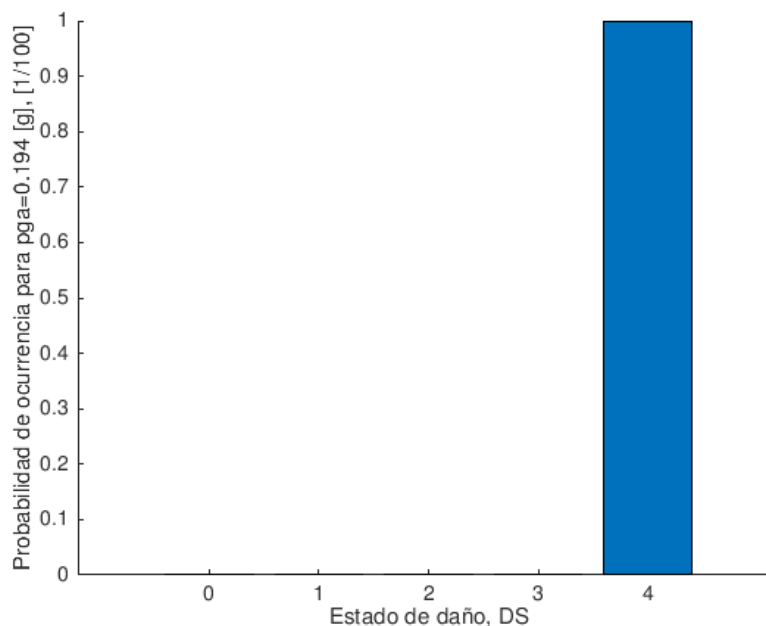


Figura A4.9. Estado de daño con $p_{ga}=0,194g$ del Edificio 1 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

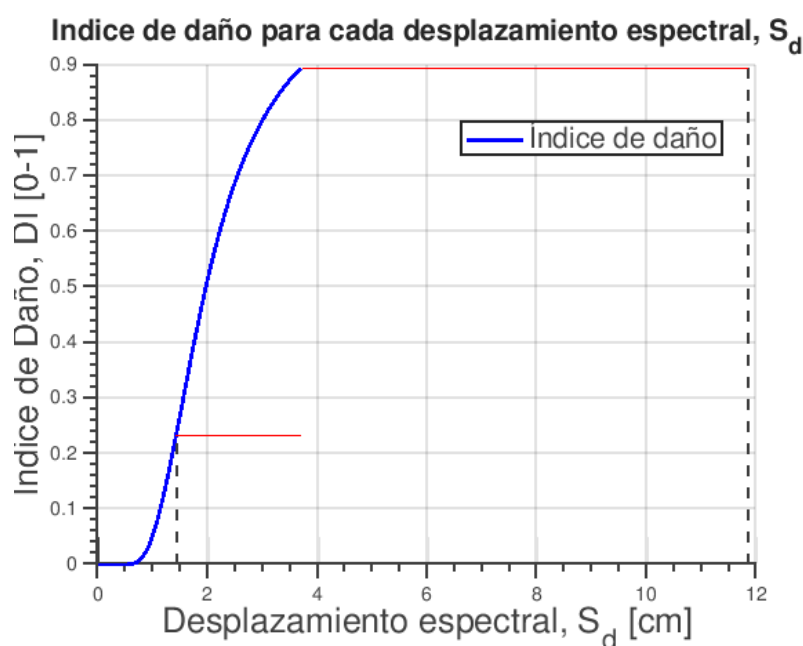


Figura A4.10. Índice de daño del Edificio 1 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

- Dirección en el eje Y sentido Negativo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje Y en sentido Negativo.

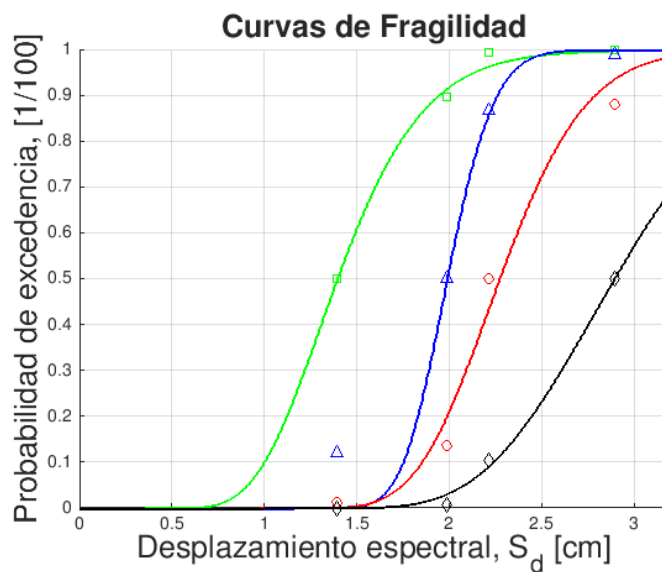


Figura A4.11. Curvas de fragilidad del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

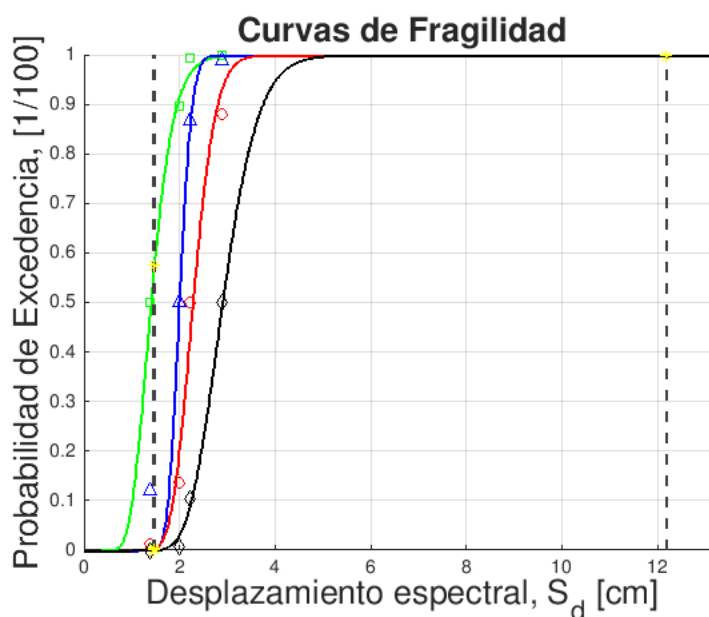


Figura A4.12. Curva de fragilidad del Edificio 1 en el eje Y Negativo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

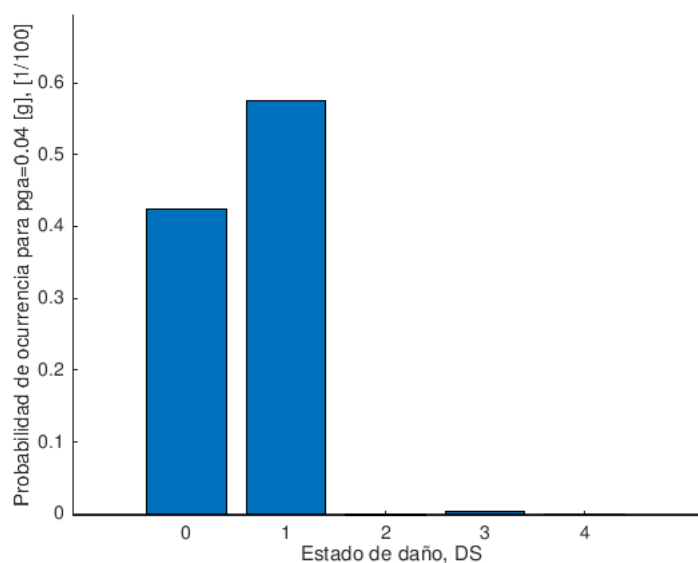


Figura A4.13. Estado de daño con pga=0,04g del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

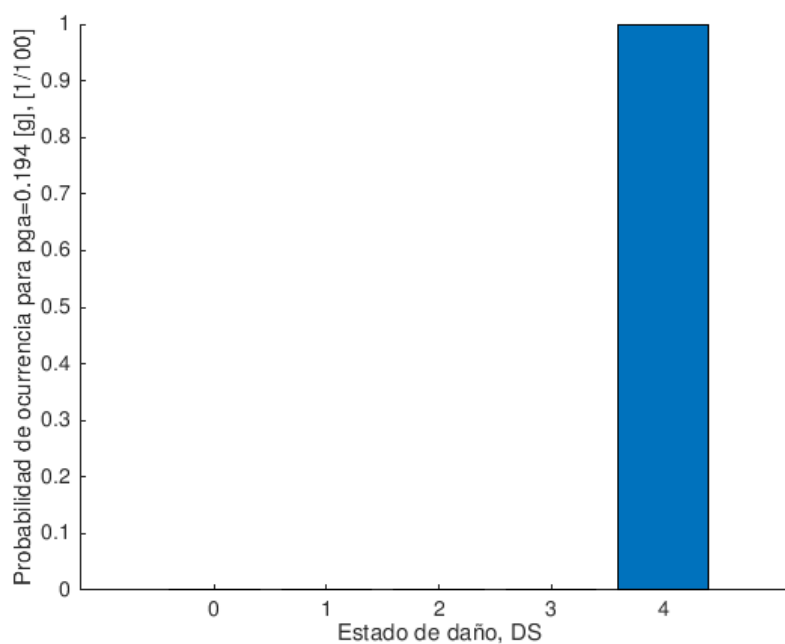


Figura A4.14. Estado de daño con pga=0,194g del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

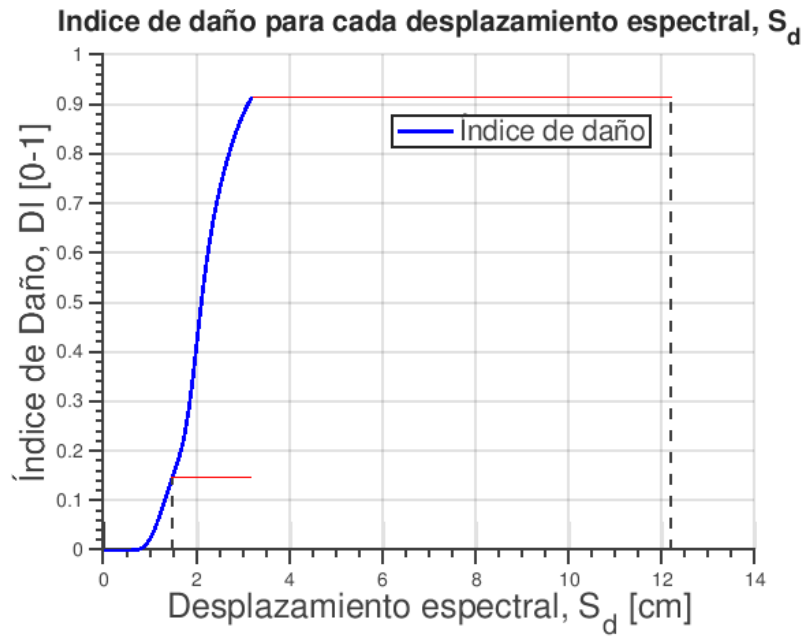


Figura A4.15. Índice de daño del Edificio 1 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

A5. Gráficas de los resultados de Fragilidad en el Edificio 2 aislado

- Dirección en el eje X sentido Negativo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje X en sentido Negativo.

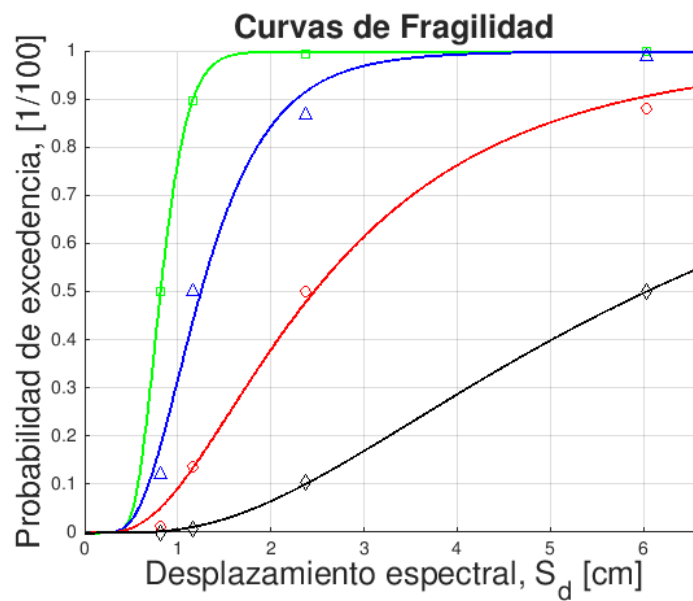


Figura A5.1. Curvas de fragilidad del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

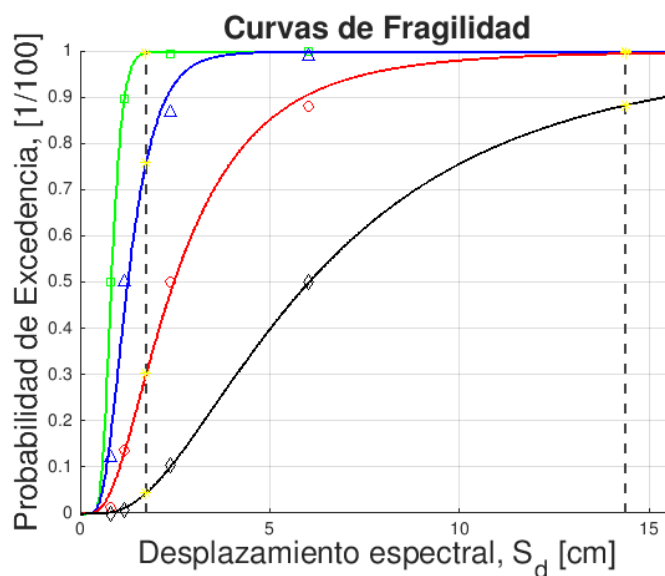


Figura A5.2. Curva de fragilidad del Edificio 2 en el eje X Negativo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

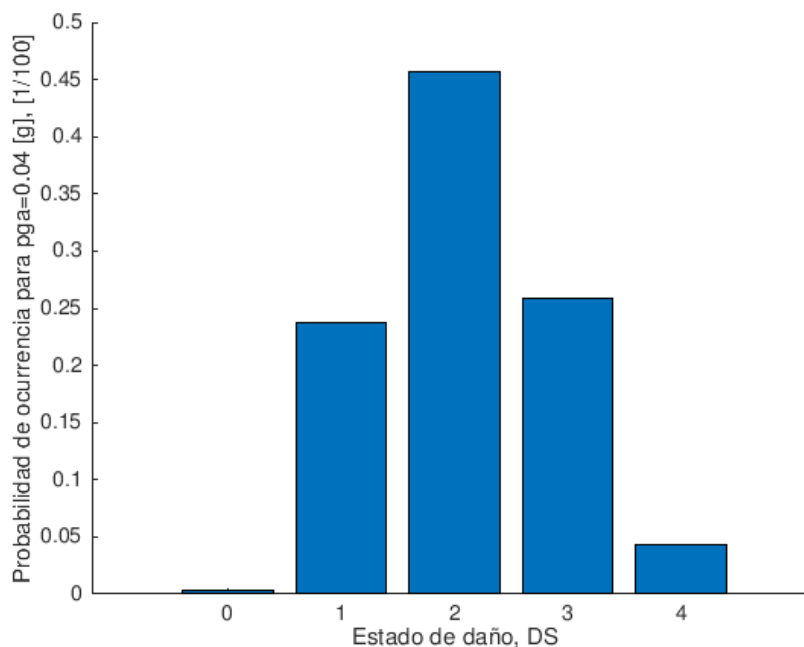


Figura A5.3. Estado de daño con $p_{ga}=0,04g$ del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

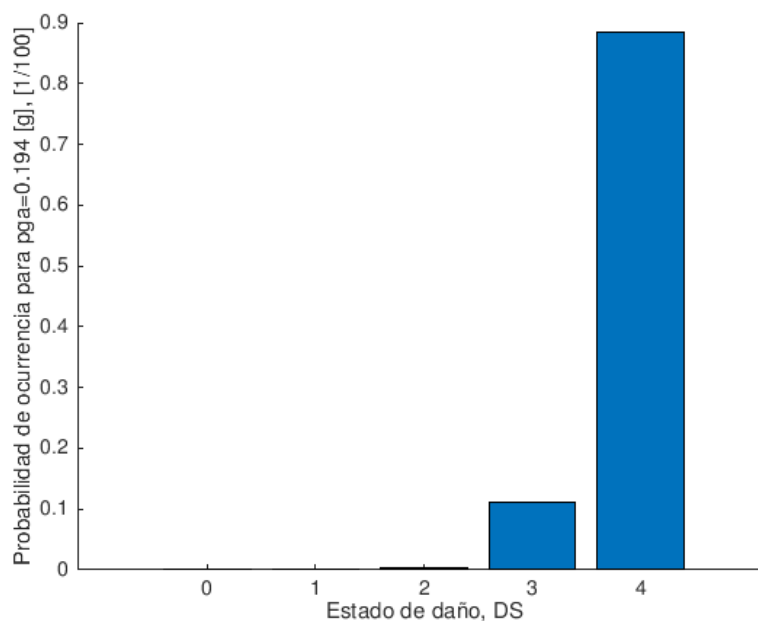


Figura A5.4. Estado de daño con $p_{ga}=0.194g$ del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

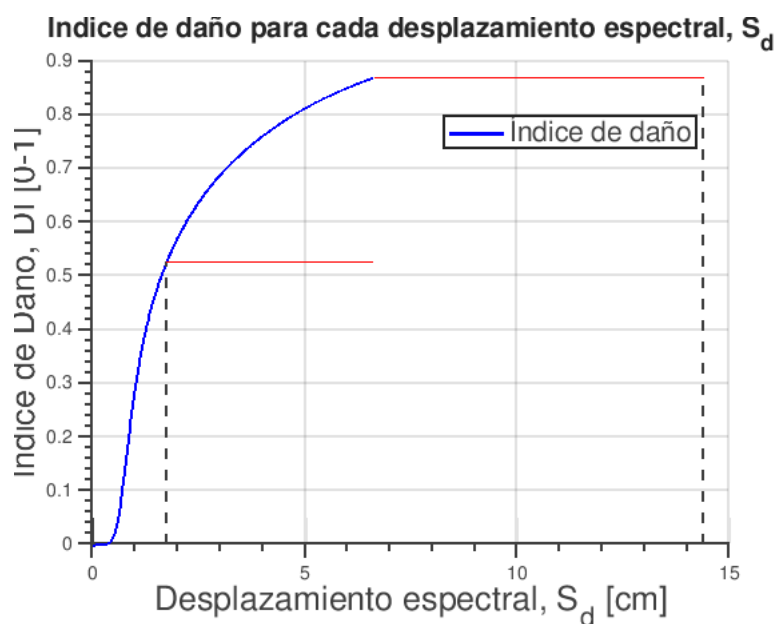


Figura A5.5. Índice de daño del Edificio 2 en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

- Dirección en el eje Y sentido Positivo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje Y en sentido Positivo.

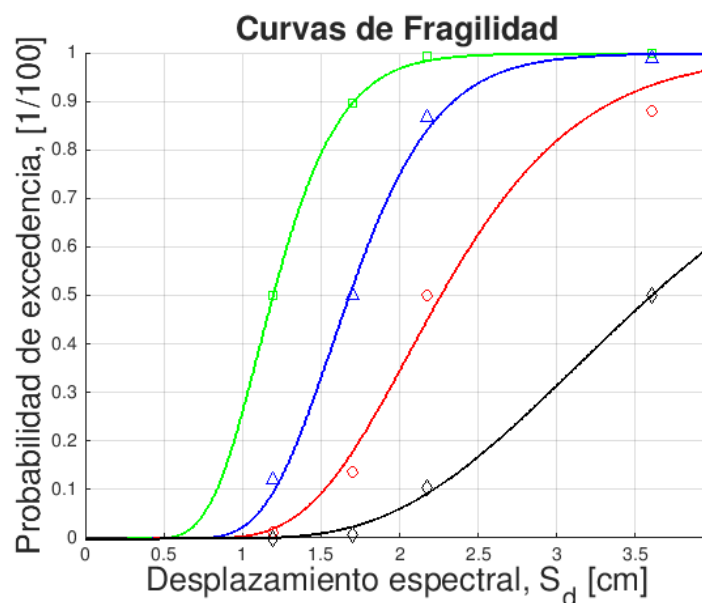


Figura A5.6. Curvas de fragilidad del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

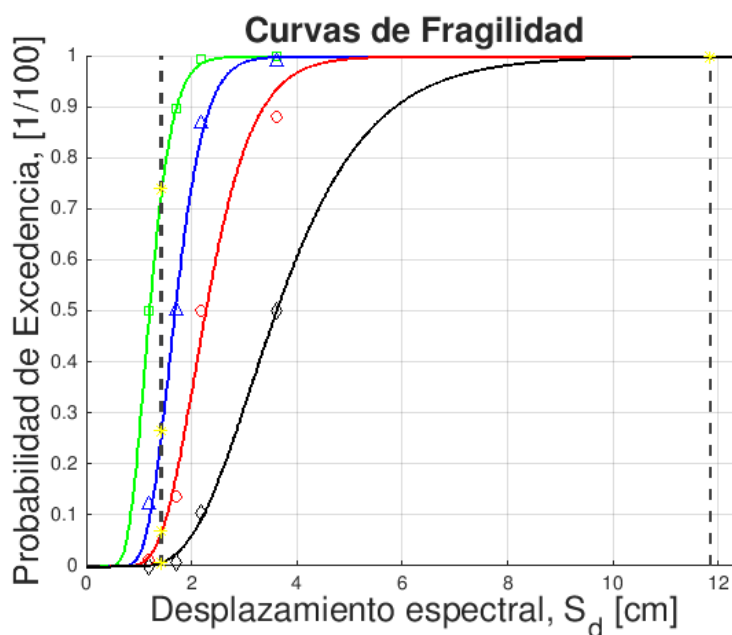


Figura A5.7. Curva de fragilidad del Edificio 2 en el eje Y Positivo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

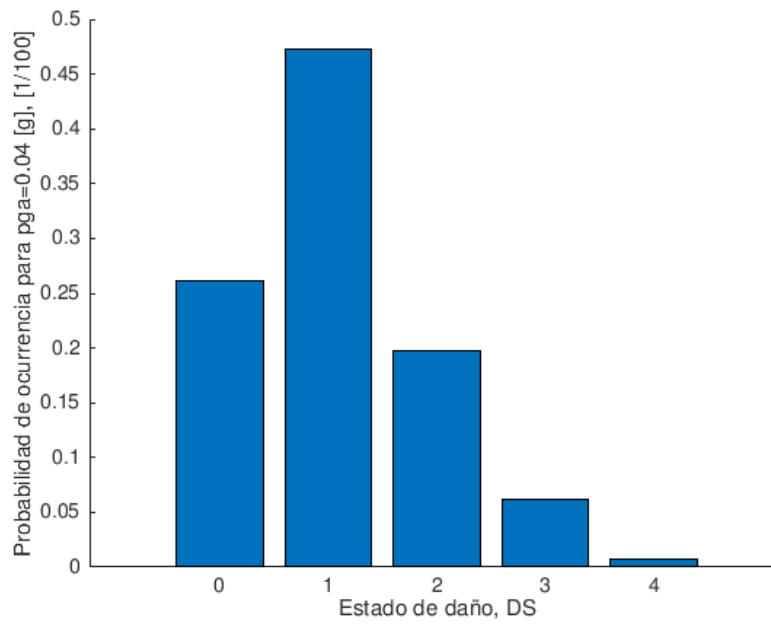


Figura A5.8. Estado de daño con $p_{ga}=0.04g$ del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

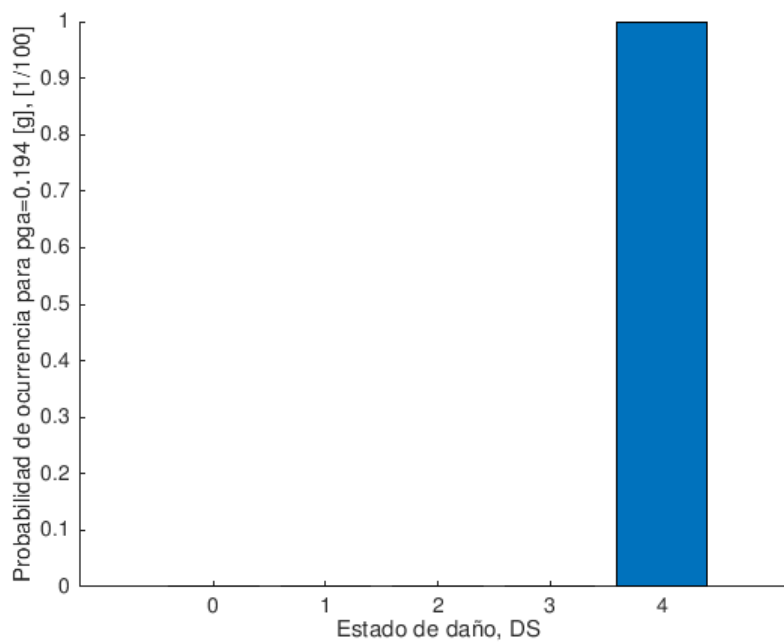


Figura A5.9. Estado de daño con $p_{ga}=0.194g$ del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

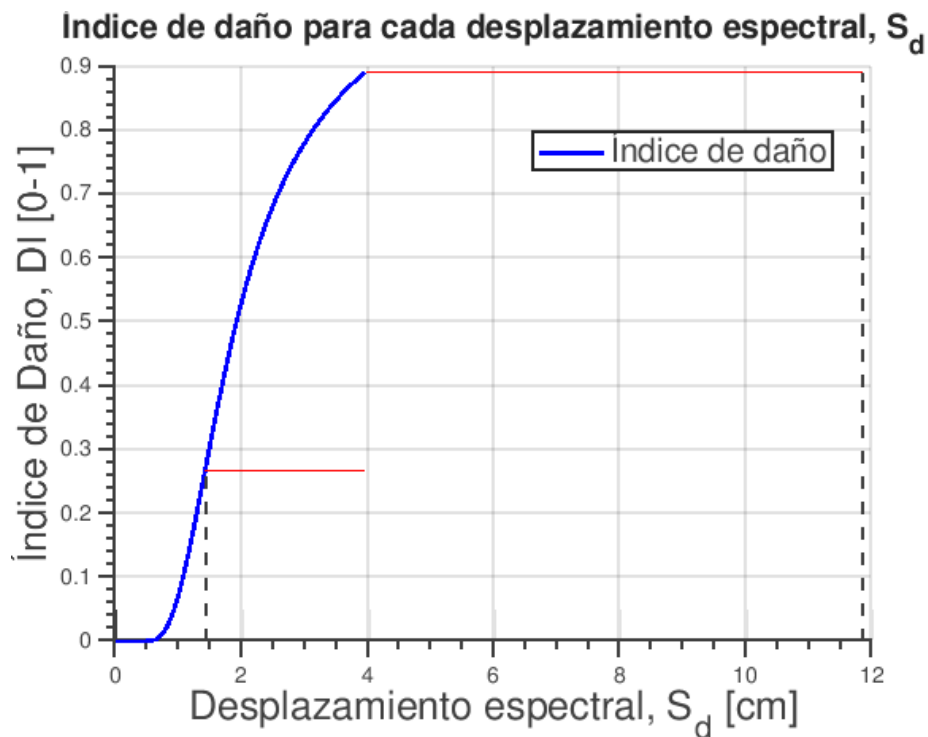


Figura A5.10. Índice de daño del Edificio 2 en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

- Dirección en el eje Y sentido Negativo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje Y en sentido Negativo.

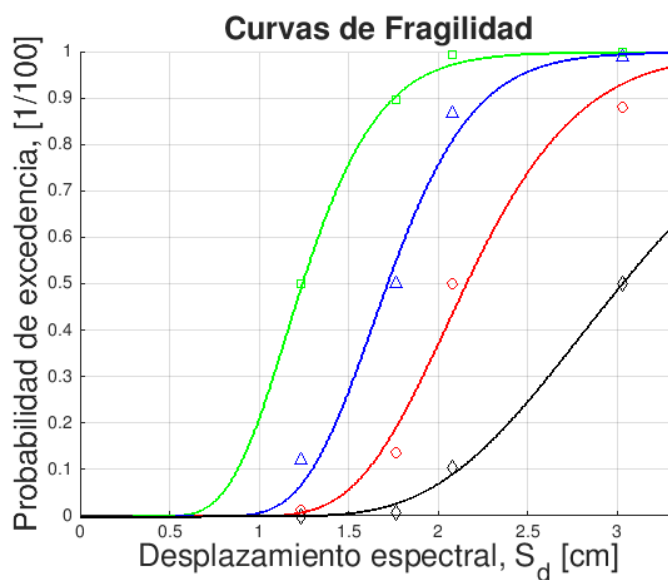


Figura A5.11. Curvas de fragilidad del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

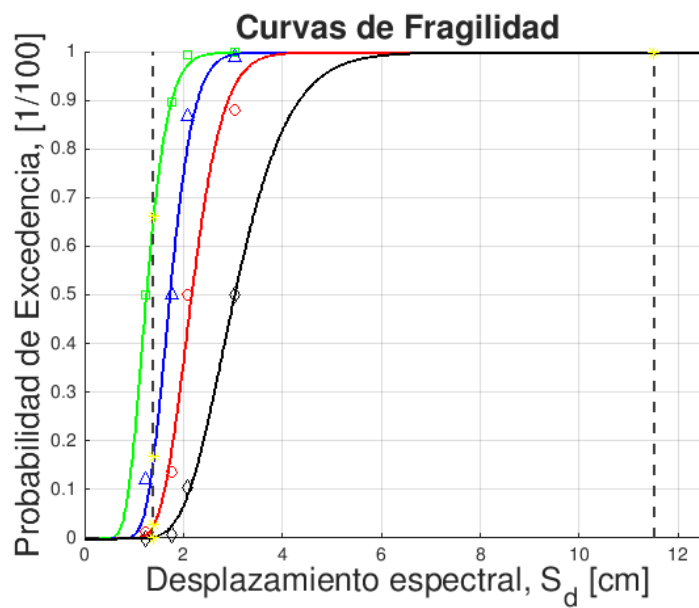


Figura A5.12. Curva de fragilidad del Edificio 2 en el eje Y Negativo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

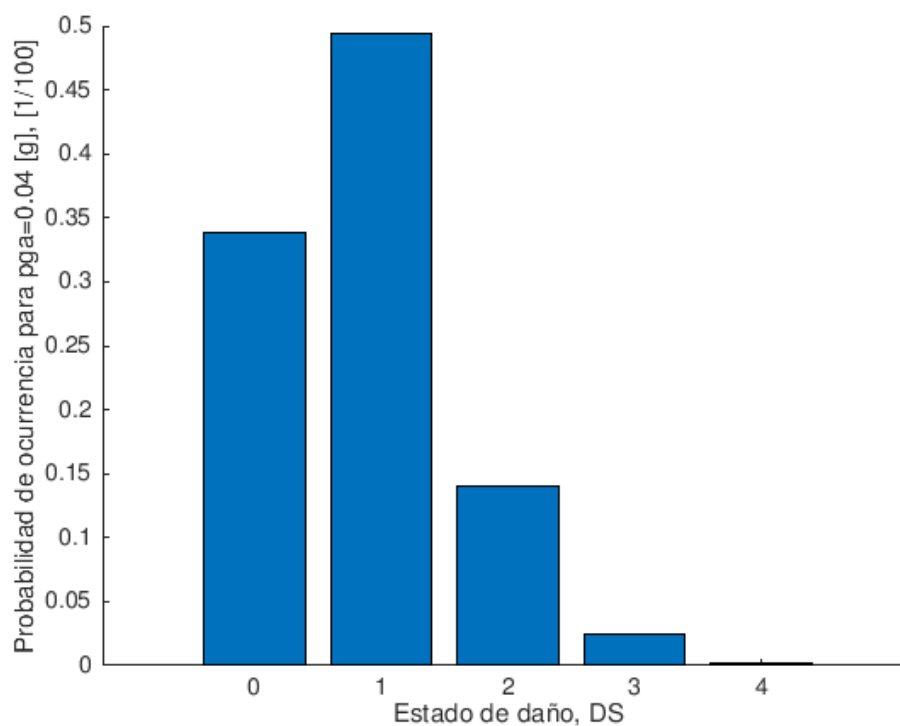


Figura A5.13. Estado de daño con pga=0,04g del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

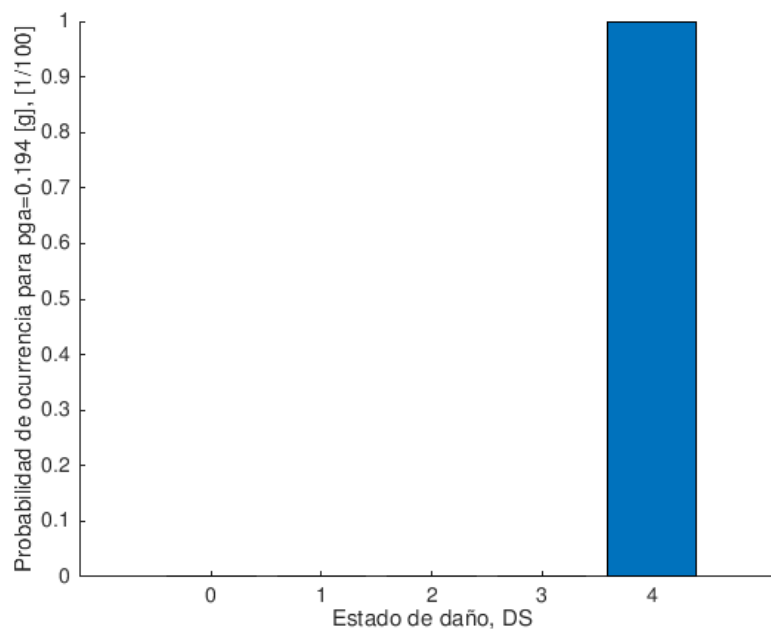


Figura A5.14. Estado de daño con pga=0,194g del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

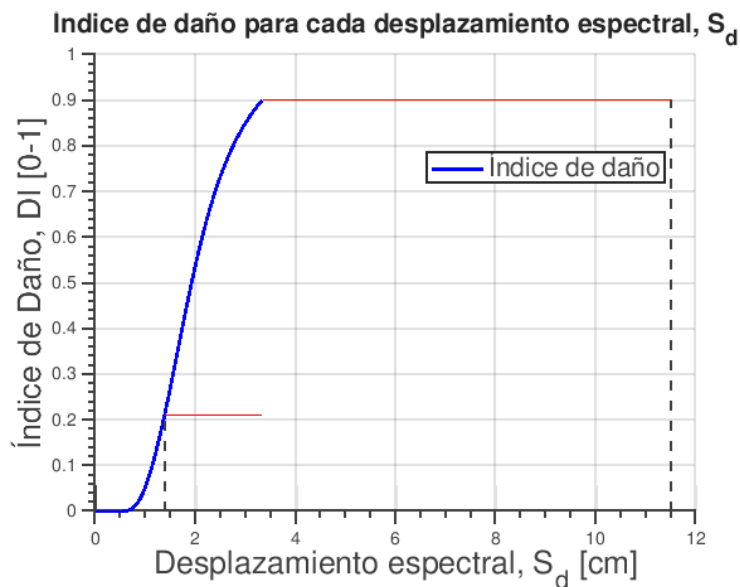


Figura A5.15. Índice de daño en el del Edificio 2 en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

A6. Gráficas de los resultados de Fragilidad en el Agregado

- Dirección en el eje X sentido Negativo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje X en sentido Negativo.

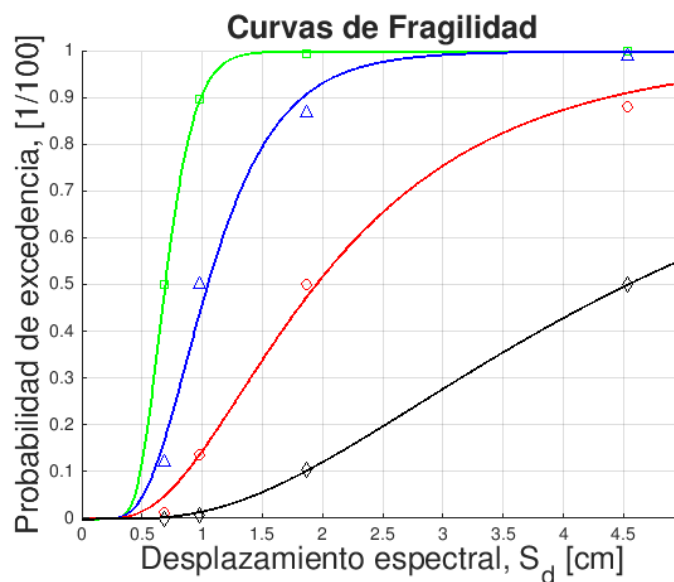


Figura A6.1. Curvas de fragilidad del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

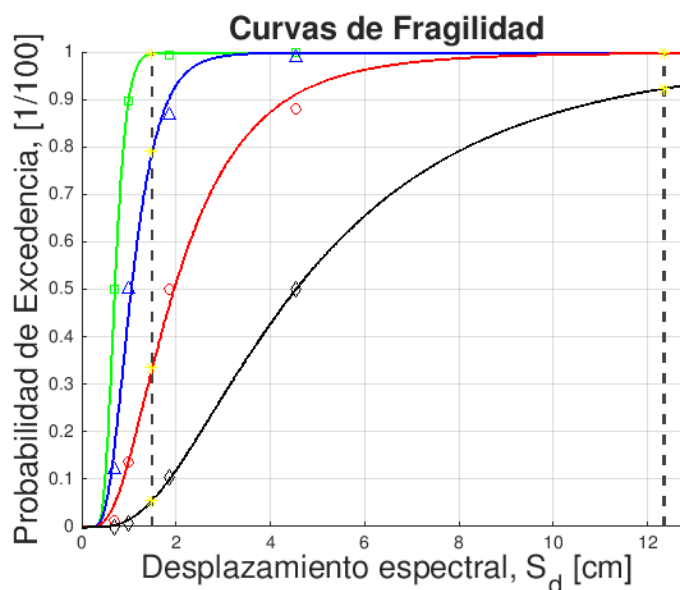


Figura A6.2. Curva de fragilidad del Agregado en el eje X Negativo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

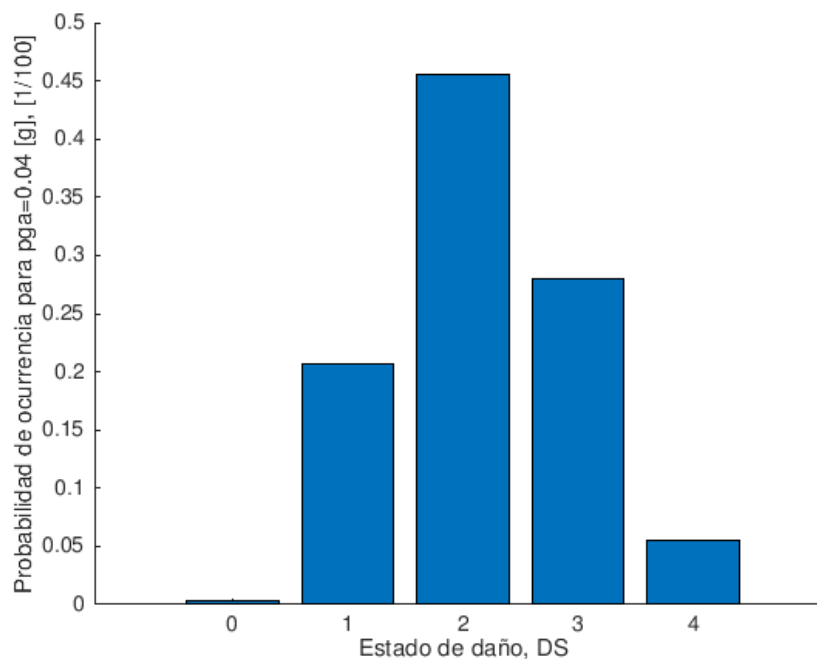


Figura A6.3. Estado de daño con pga=0,04g del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

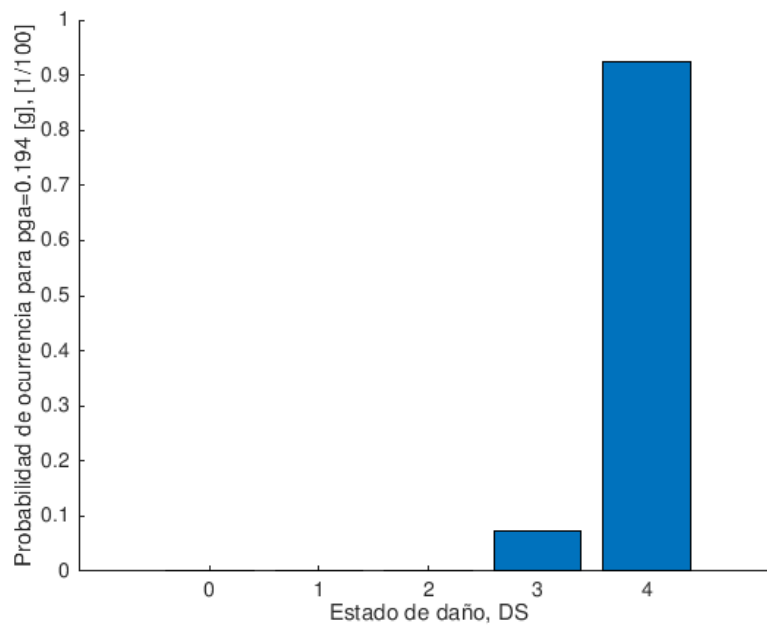


Figura A6.4. Estado de daño con $p_{ga}=0.194g$ del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.



Figura A6.5. Índice de daño del Agregado en el eje X Negativo (Fuente: Propia)

- Dirección en el eje Y sentido Positivo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje Y en sentido Positivo.

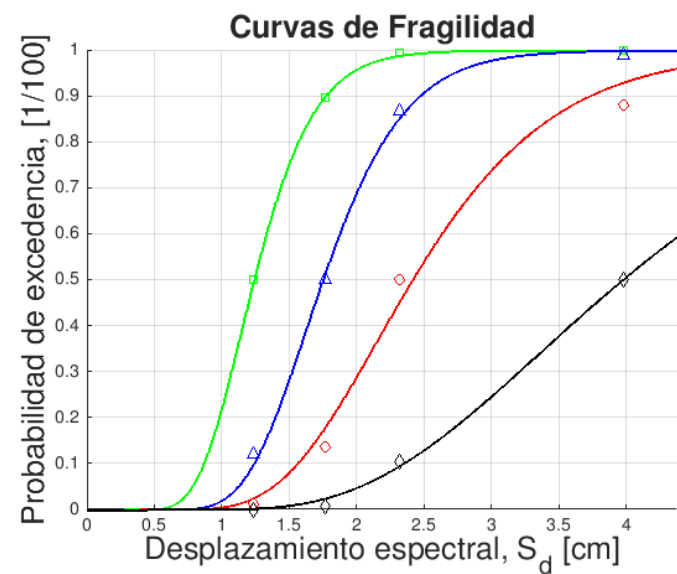


Figura A6.6. Curvas de fragilidad del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

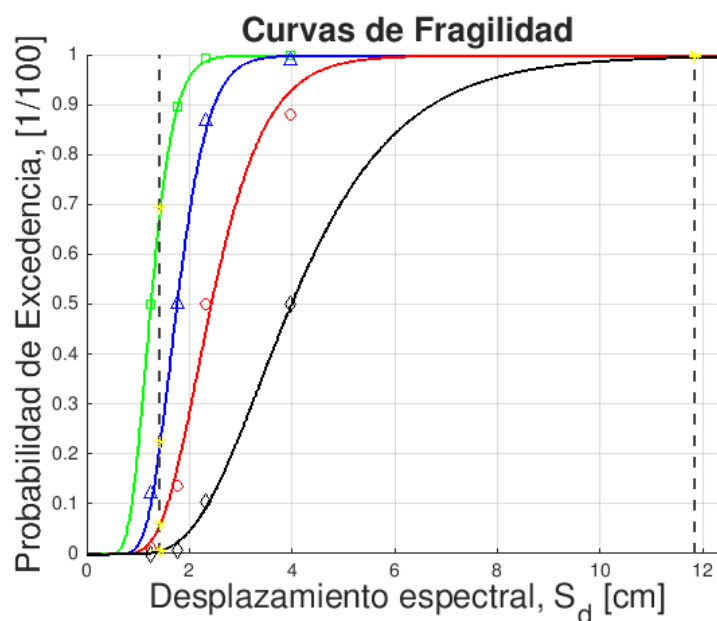


Figura A6.7. Curva de fragilidad del Agregado en el eje Y Positivo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

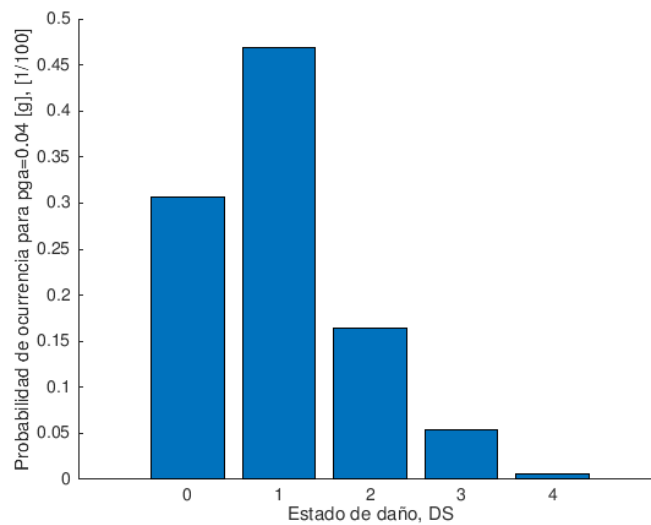


Figura A6.8. Estado de daño con pga=0,04g del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

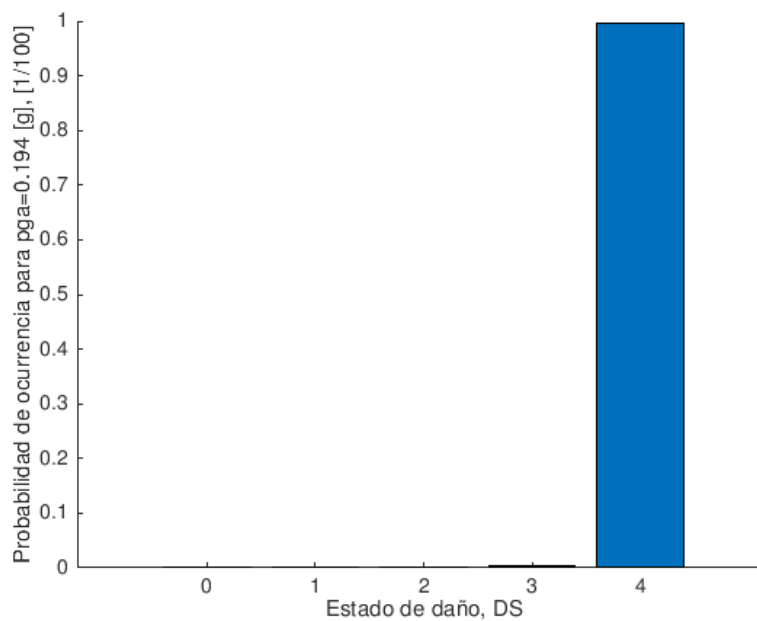


Figura A6.9. Estado de daño con pga=0,194g del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.

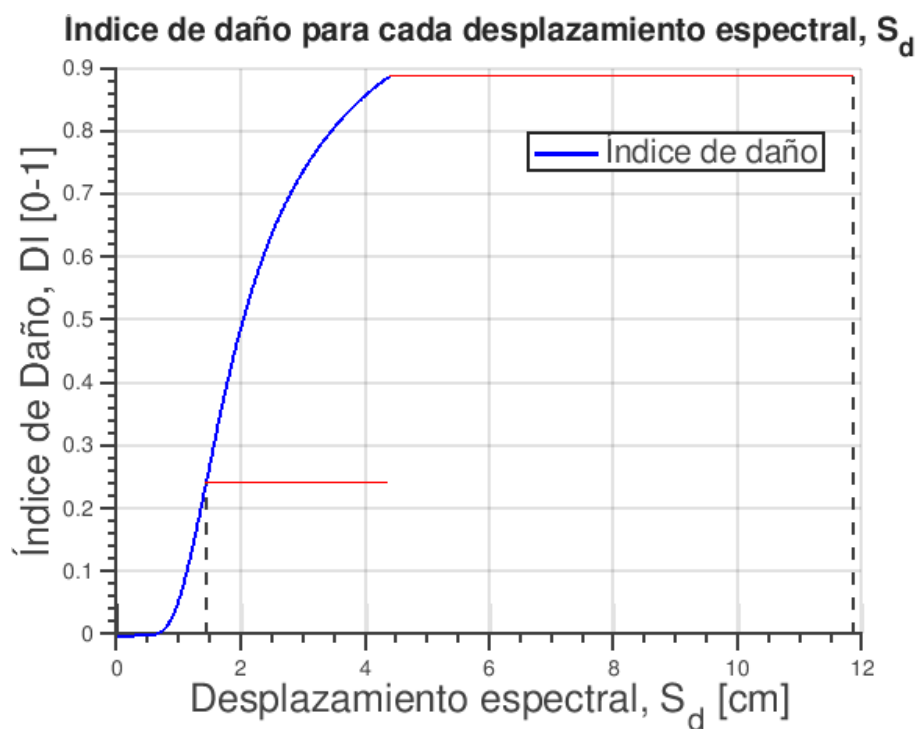


Figura A6.10. Índice de daño en el del Agregado en el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

- Dirección en el eje Y sentido Negativo

Se presenta la curva de fragilidad para el análisis del eje Y en sentido Negativo.

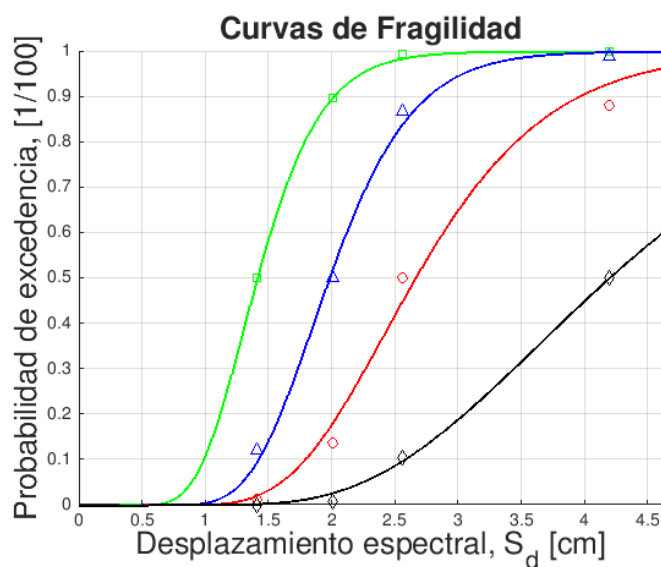


Figura A6.11. Curvas de fragilidad del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Se determina la probabilidad de excedencia para cada desplazamiento espectral encontrado para cada aceleración pico, correspondientes a 0,04g y 0,194g.

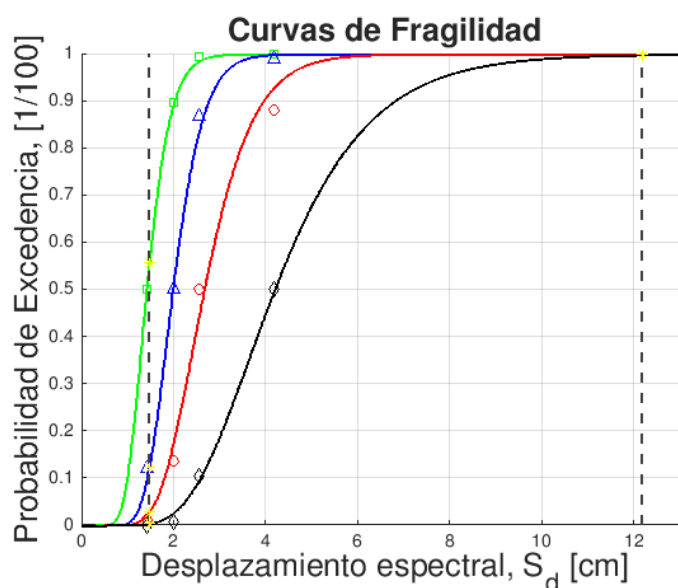


Figura A6.12. Curva de fragilidad del Agregado en el eje Y Negativo para cada desplazamiento espectral (Fuente: Propia)

A partir de las curvas de fragilidad se obtienen el estado de daño para las aceleraciones pico mostradas en el análisis estático no lineal.

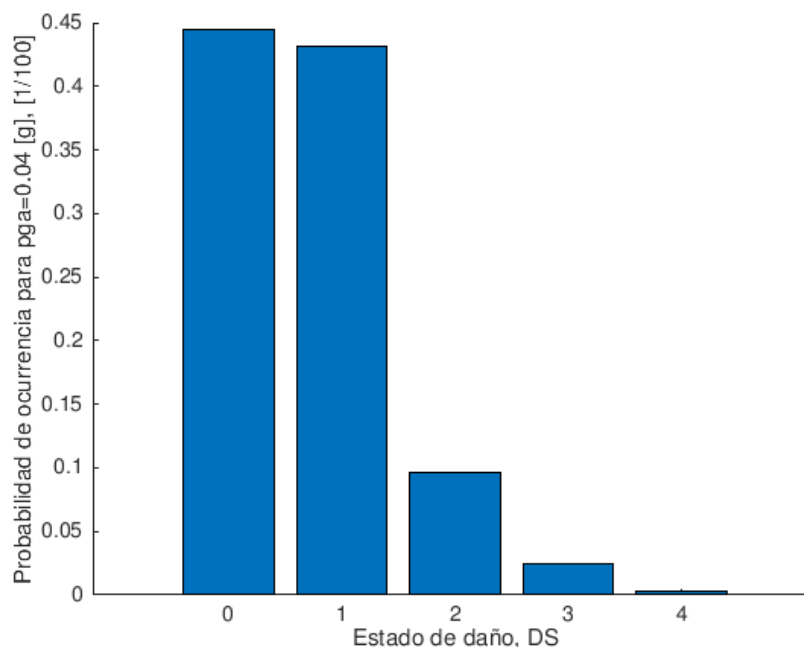


Figura A6.13. Estado de daño con pga=0,04g del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

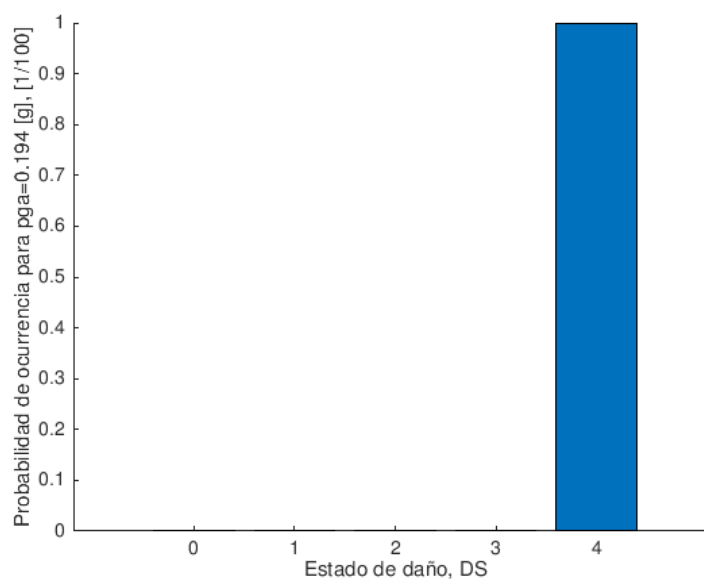


Figura A6.14. Estado de daño con $p_{ga}=0.194g$ del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra la curva del índice de daño con respecto a los desplazamientos en el punto de desempeño encontrados en el análisis estático no lineal.



Figura A6.15. Índice de daño del Agregado en el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

A7. Curvas de capacidad

- Comparativa entre el Edificio 1 y el Agregado:

Se muestra gráficamente la comparativa entre las curvas de capacidad cuando el Edificio 1 está aislado y cuando están los dos edificios agregados.

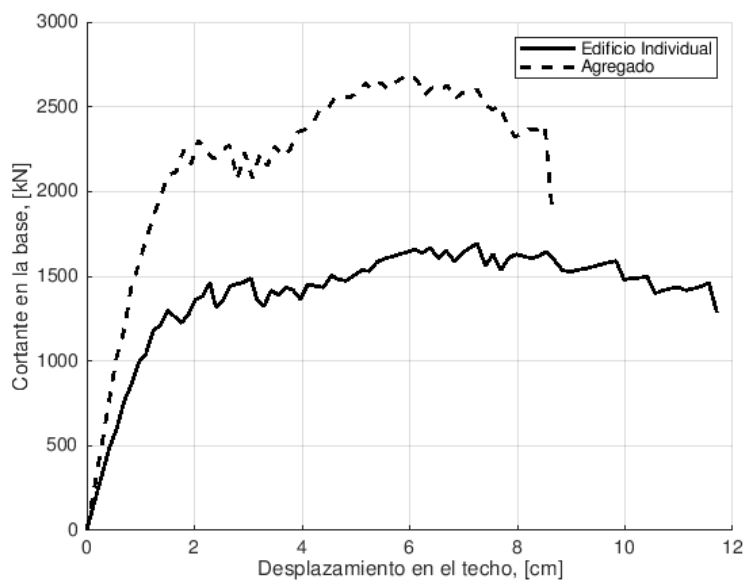


Figura A7.1. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 1 y el Agregado para el eje X Negativo (Fuente: Propia)

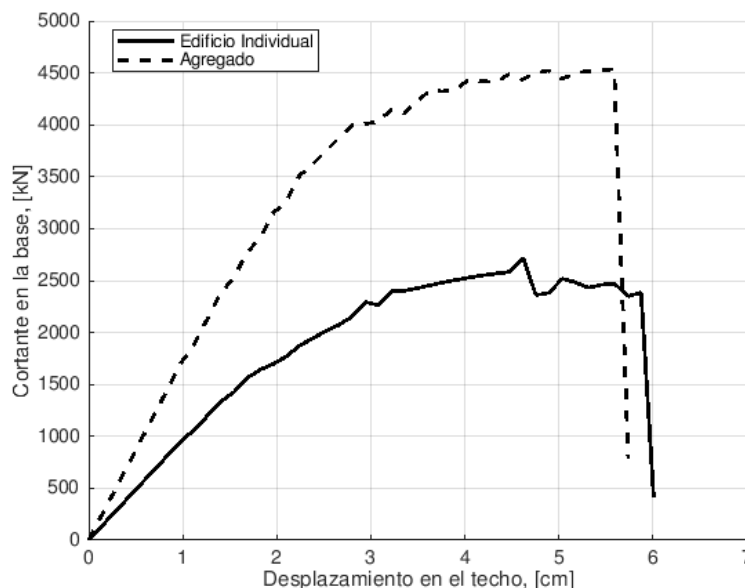


Figura A7.2. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 1 y el Agregado para el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

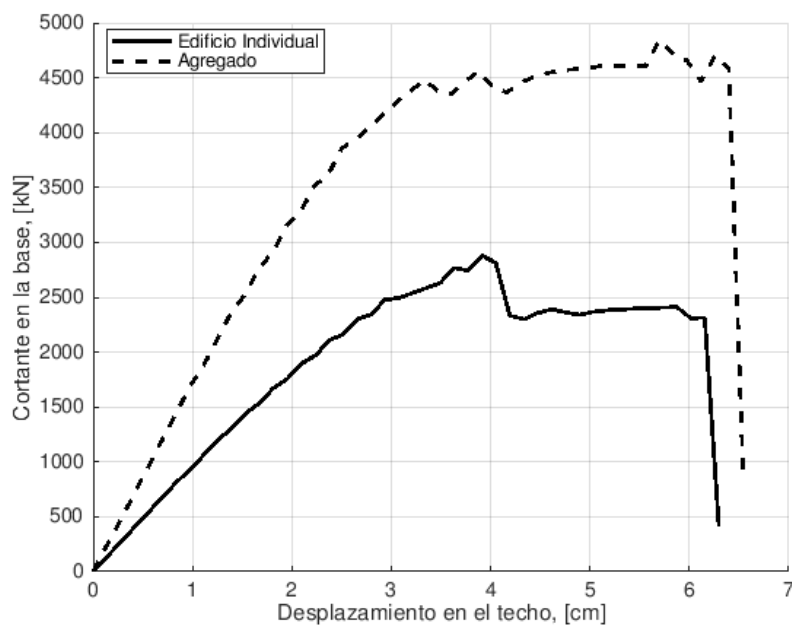


Figura A7.3. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 1 y el Agregado para el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

- **Comparativa entre el Edificio 2 y el Agregado:**

Se muestra gráficamente la comparativa entre las curvas de capacidad cuando el Edificio 2 está aislado y cuando están los dos edificios agregados.

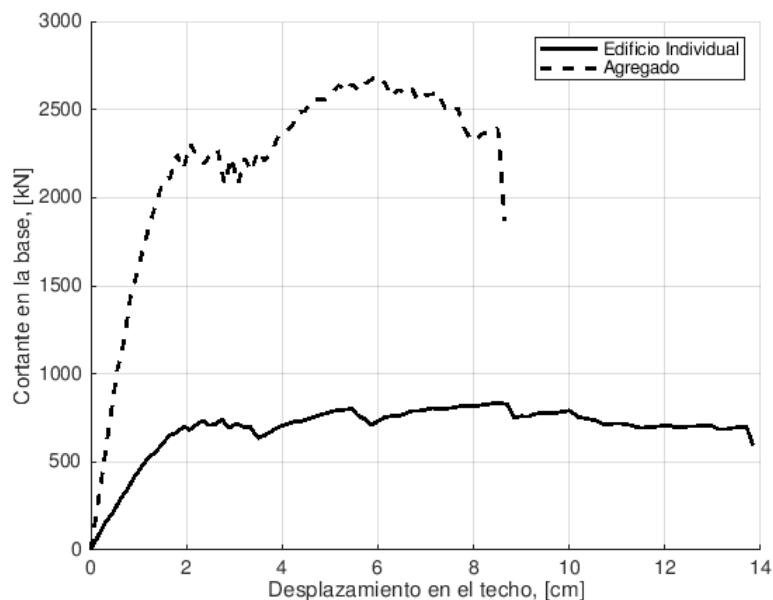


Figura A7.4. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 2 y el Agregado para el eje X Negativo (Fuente: Propia)

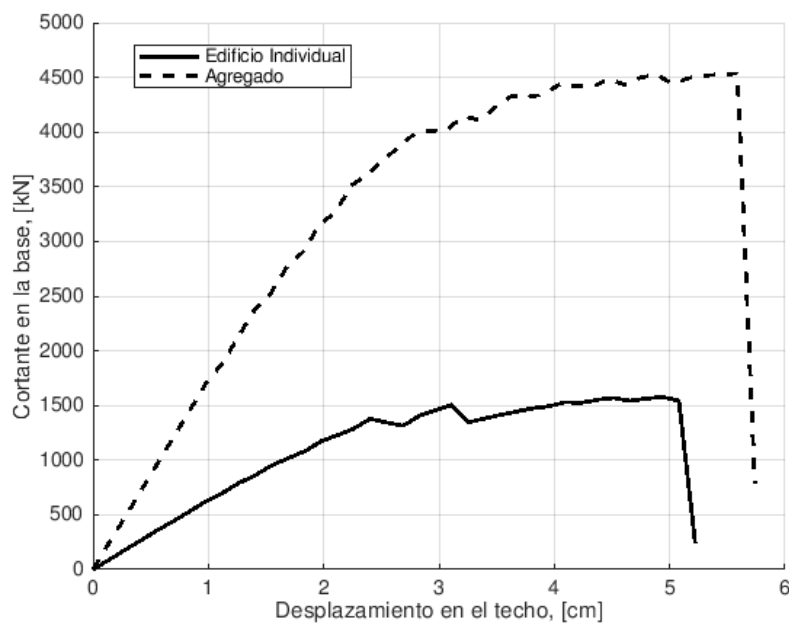


Figura A7.5. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 2 y el Agregado para el eje Y Positivo (Fuente: Propia)

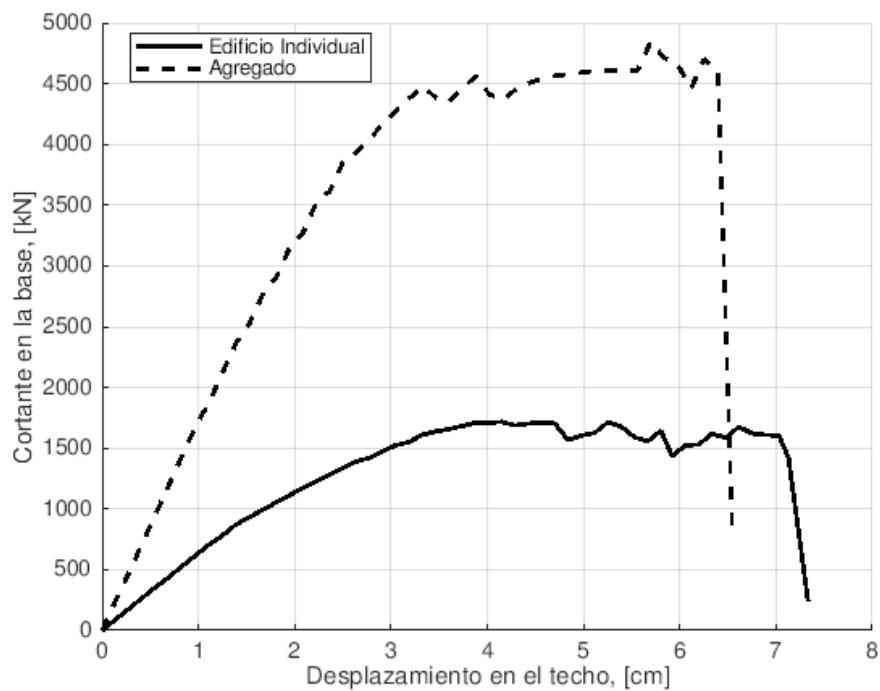


Figura A7.6. Comparativa entre las curvas de capacidad del Edificio 2 y el Agregado para el eje Y Negativo (Fuente: Propia)

A8. Contribución de los nodos de la pared al total del cortante

- Comparativa entre el Edificio 1 y el Agregado:

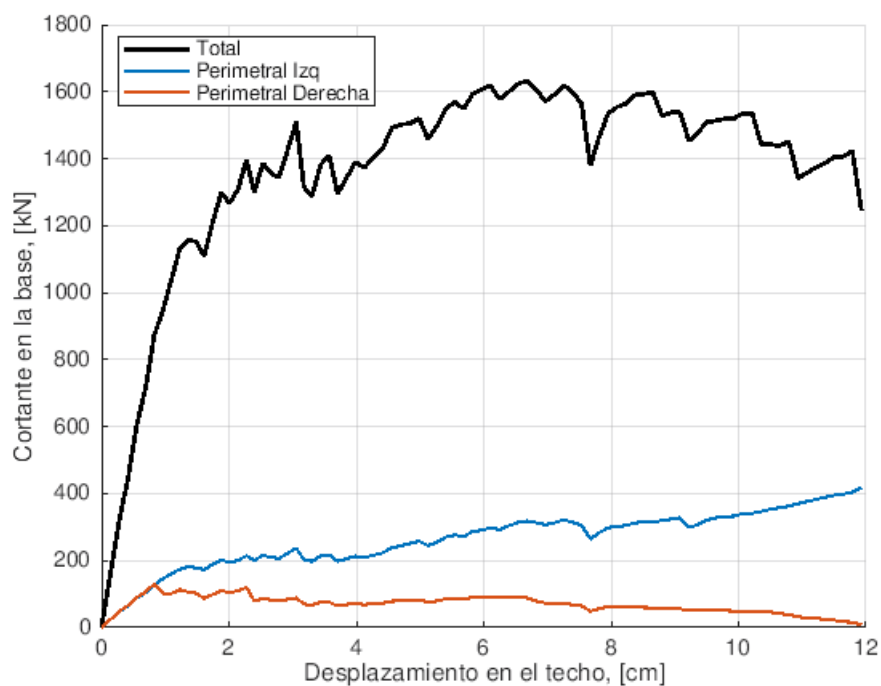


Figura A8.1. Contribución en el Edificio 1 aislado eje X Positivo (Fuente: Propia)

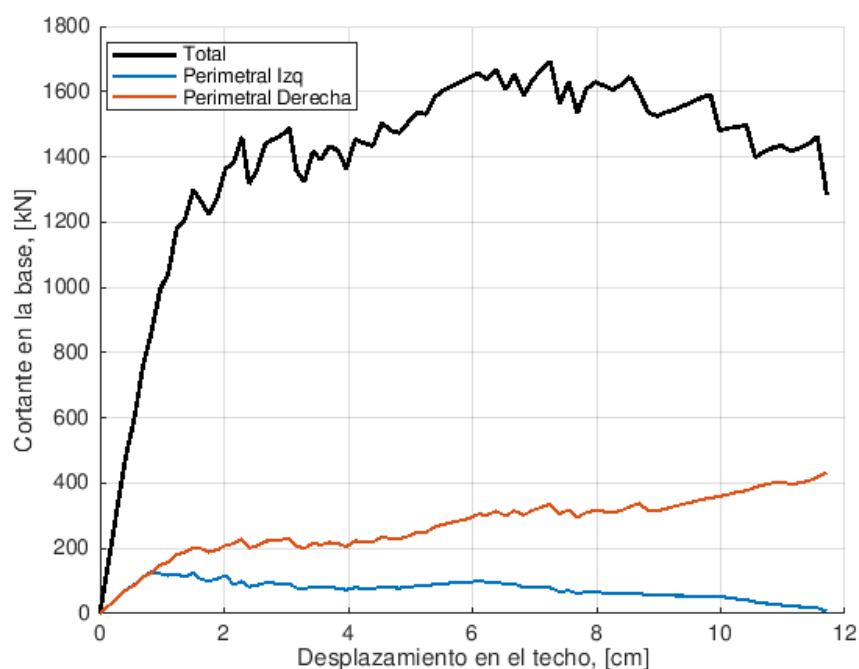


Figura A8.2. Contribución en el Edificio 1 aislado eje X Negativo (Fuente: Propia)

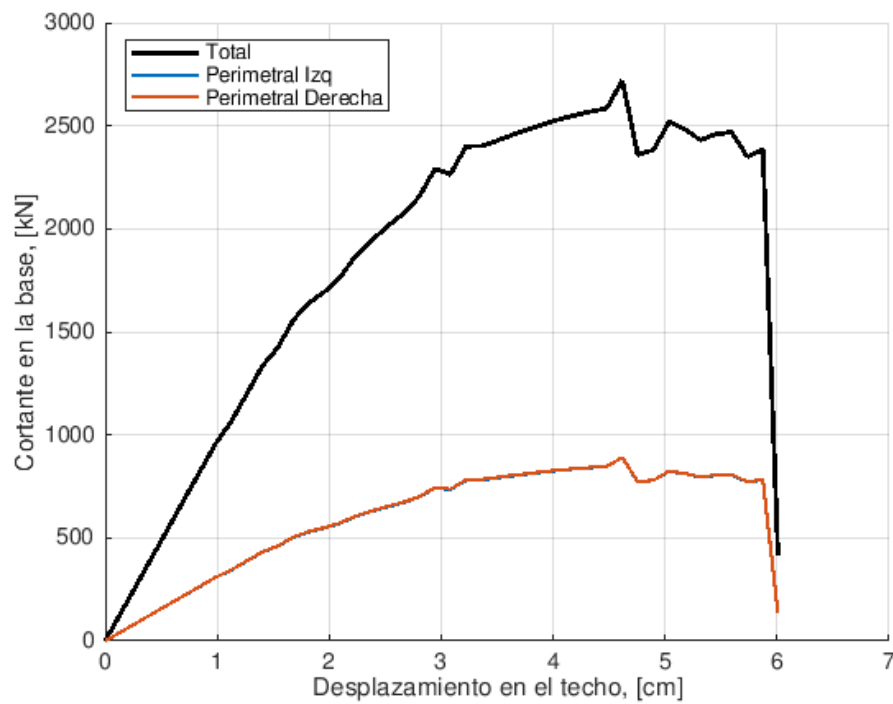


Figura A8.3. Contribución en el Edificio 1 aislado eje Y Positivo (Fuente: Propia)

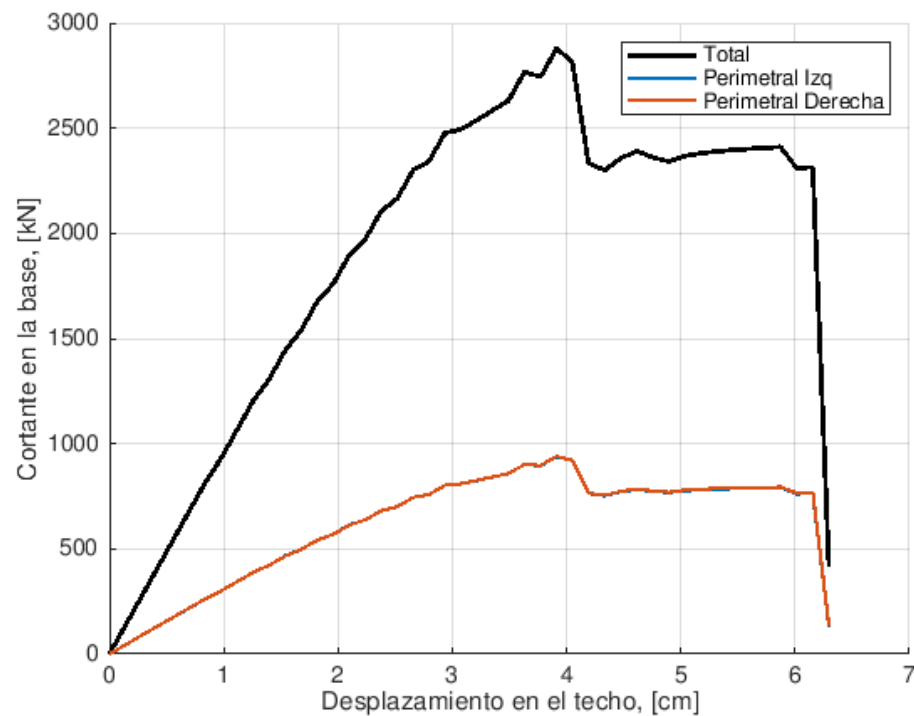


Figura A8.4. Contribución en el Edificio 1 aislado eje Y Negativo (Fuente: Propia)

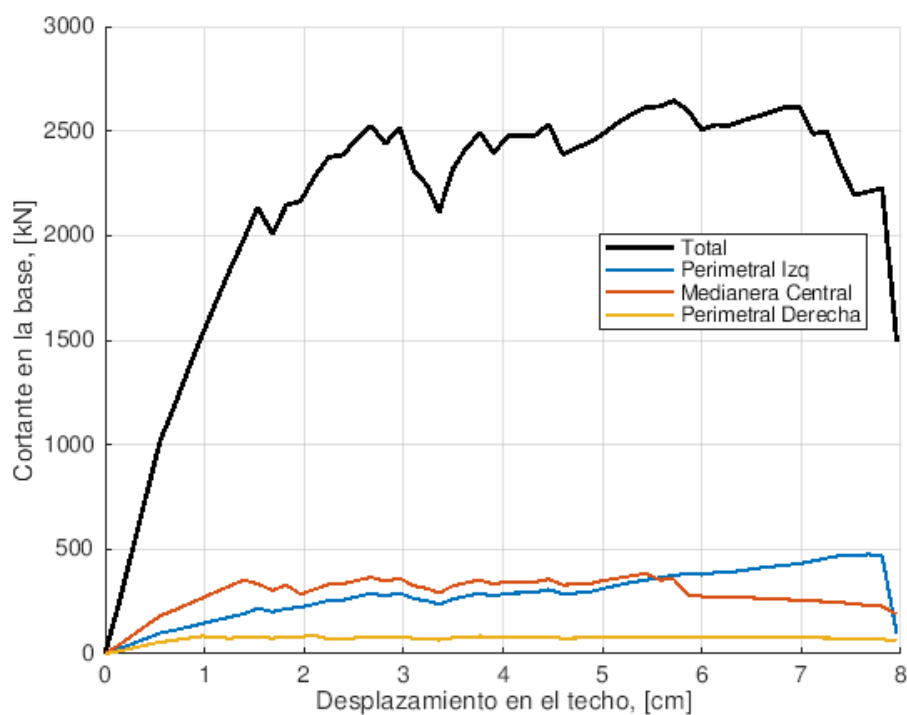


Figura A8.5. Contribución en el edificio Agregado eje X Positivo (Fuente: Propia)

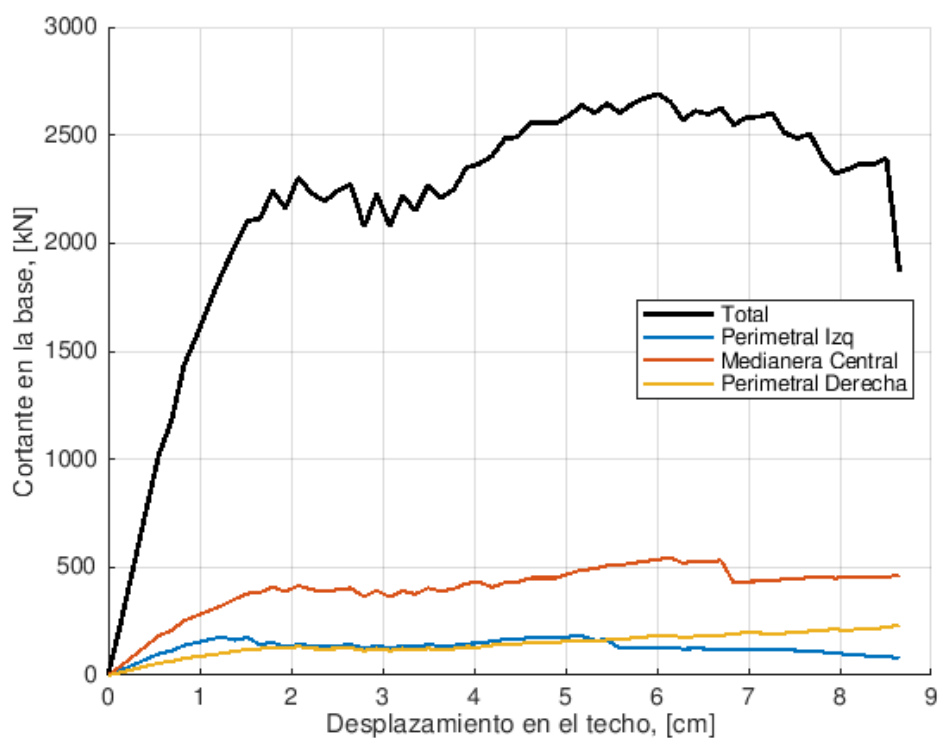


Figura A8.6. Contribución en el edificio Agregado eje X Negativo (Fuente: Propia)

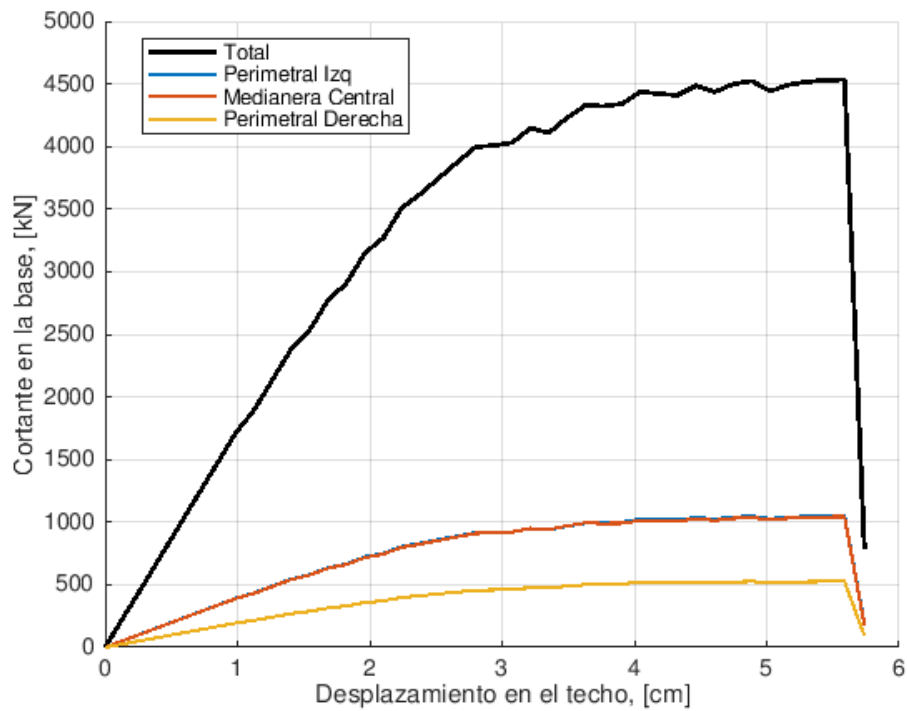


Figura A8.7. Contribución en el edificio Agregado eje Y Positivo (Fuente: Propia)

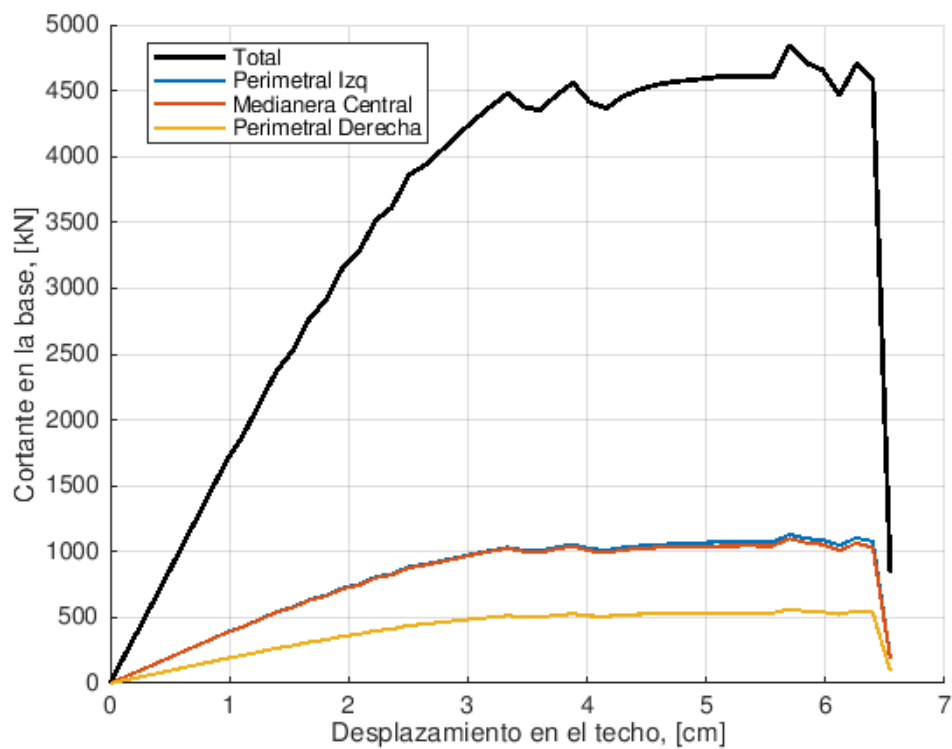


Figura A8.8. Contribución en el edificio Agregado eje Y Negativo (Fuente: Propia)

- Comparativa entre el Edificio 2 y el Agregado:

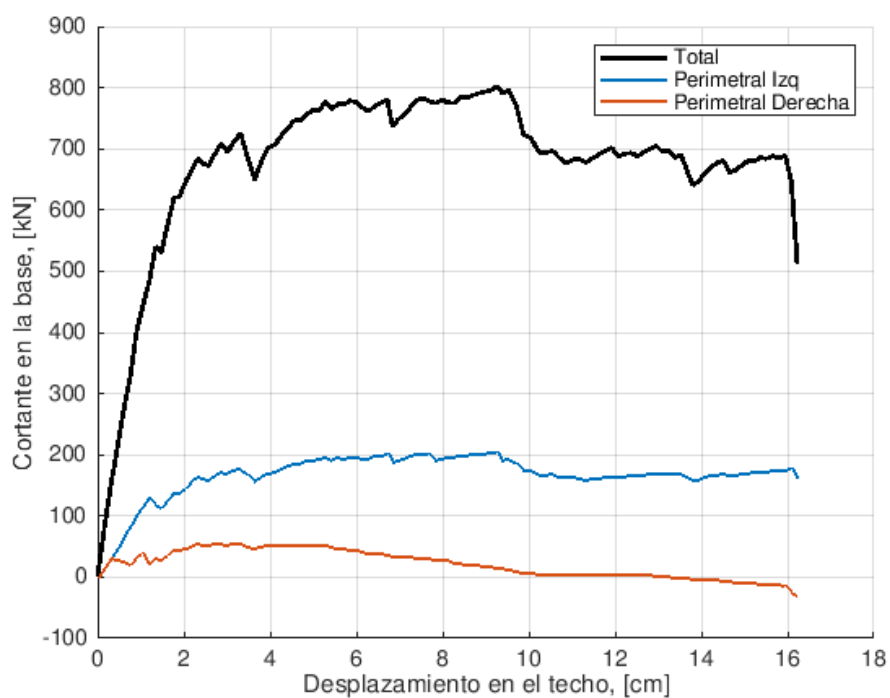


Figura A8.9. Contribución en el Edificio 2 aislado eje X Positivo (Fuente: Propia)

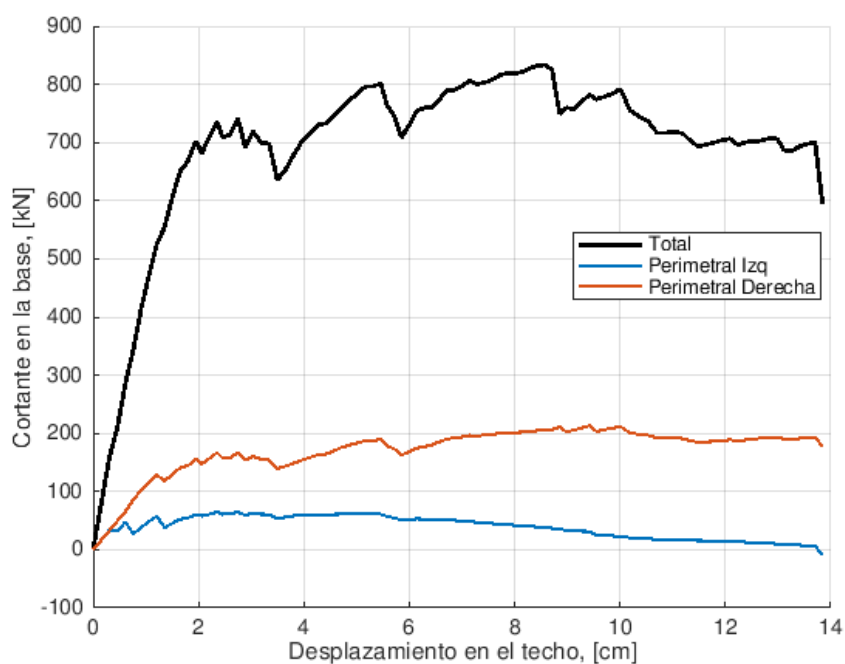


Figura A8.10. Contribución en el Edificio 2 aislado eje X Negativo (Fuente: Propia)

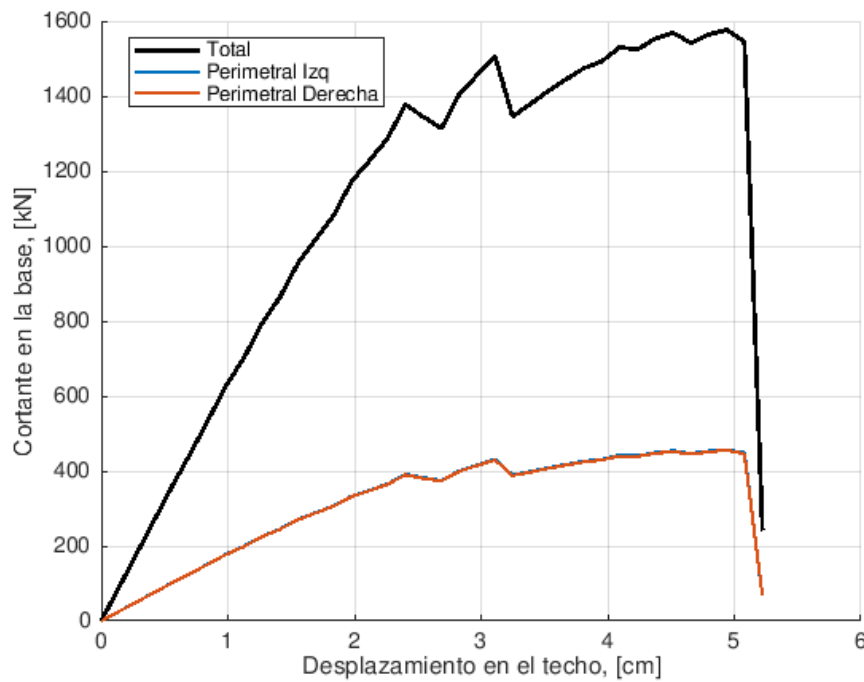


Figura A8.11. Contribución en el Edificio 2 aislado eje Y Positivo (Fuente: Propia)

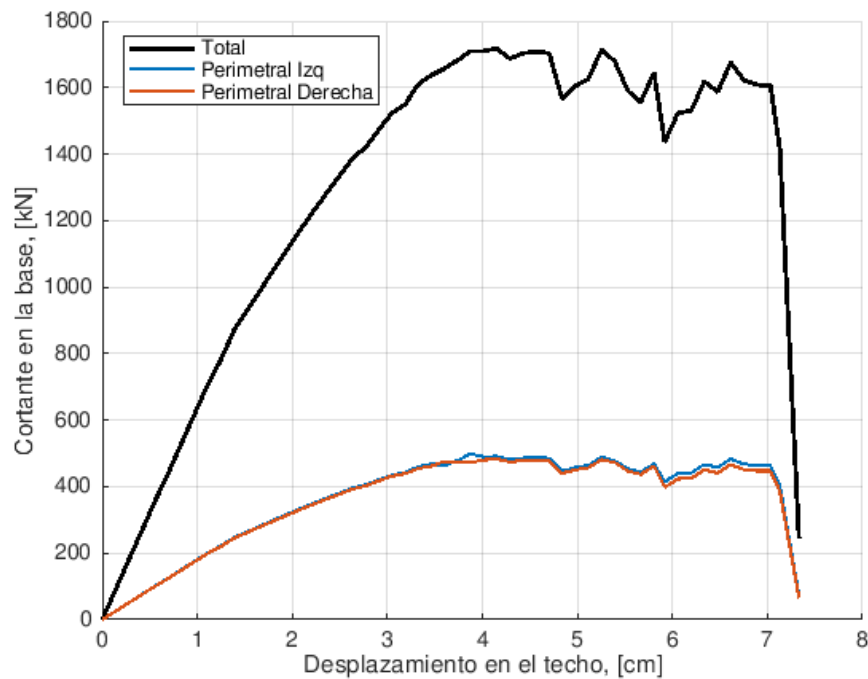


Figura A8.12. Contribución en el Edificio 2 aislado eje Y Negativo (Fuente: Propia)

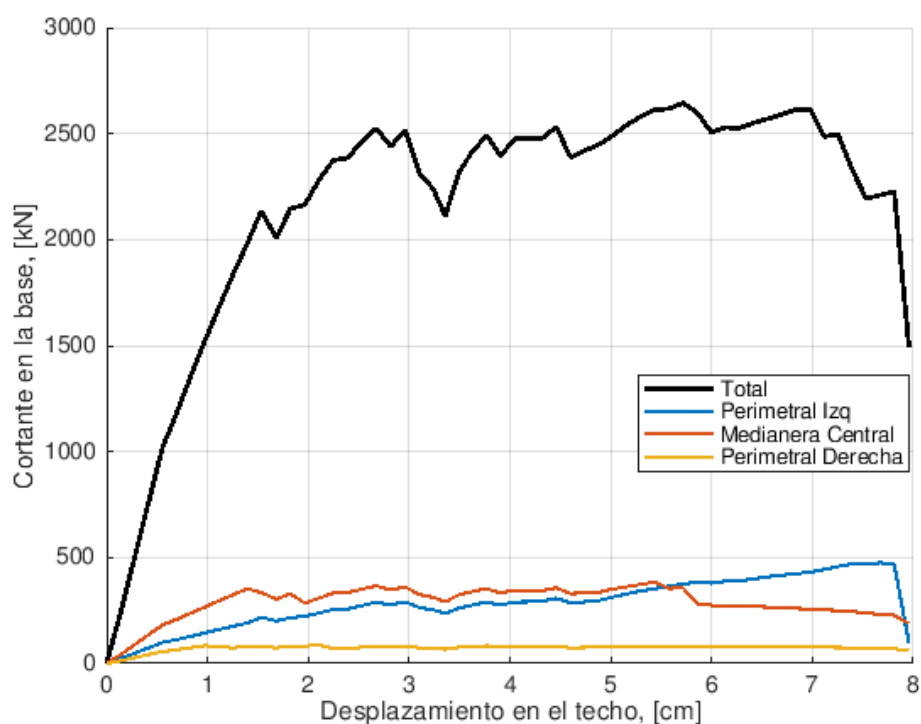


Figura A8.13. Contribución en el edificio Agregado eje X Positivo (Fuente: Propia)

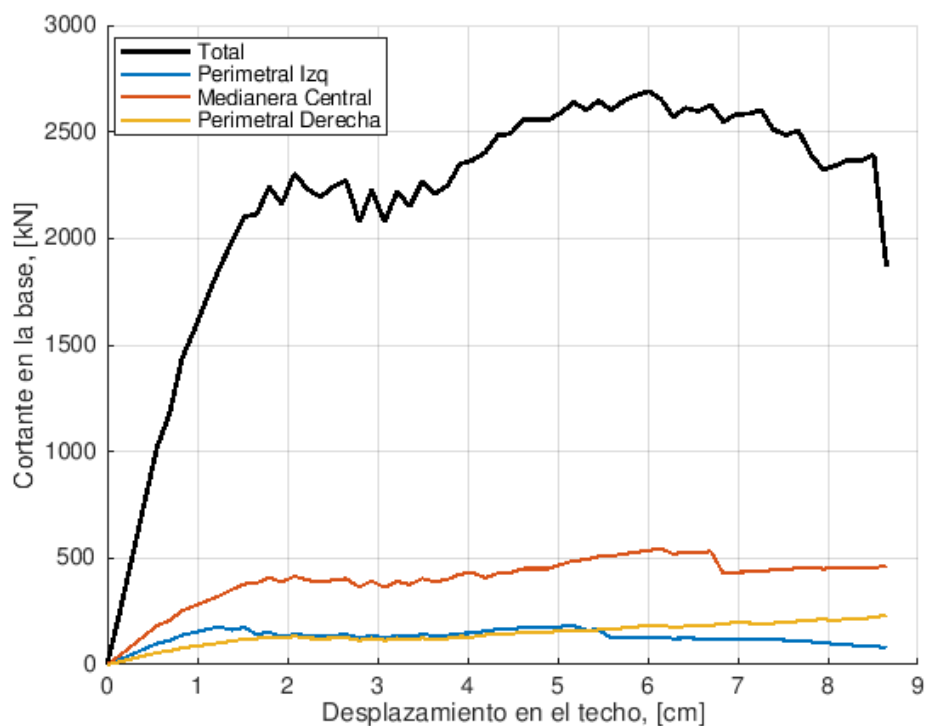


Figura A8.14. Contribución en el edificio Agregado eje X Negativo (Fuente: Propia)

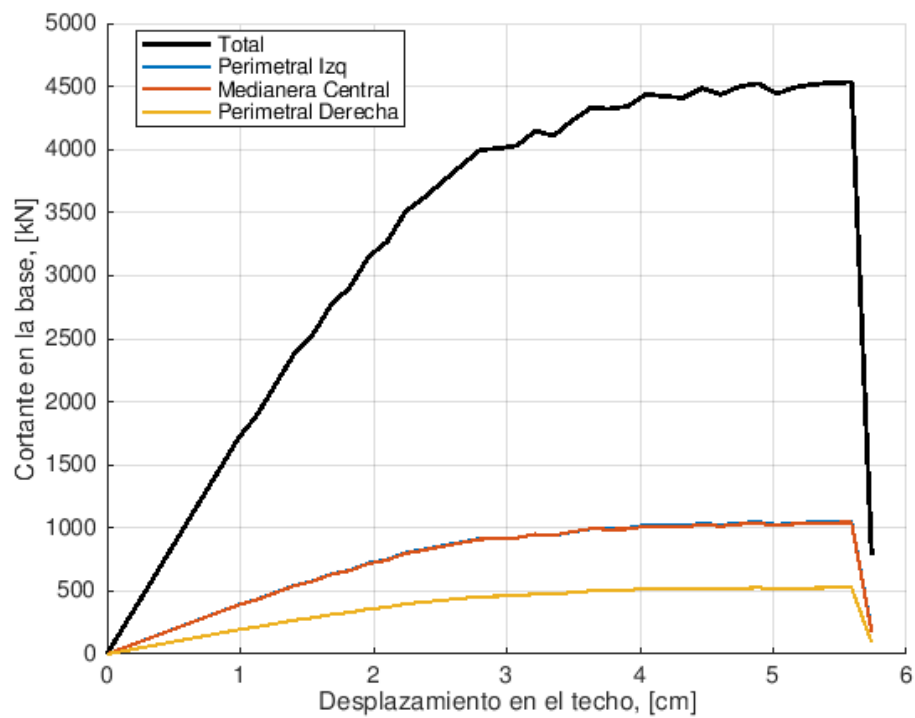


Figura A8.15. Contribución en el edificio Agregado eje Y Positivo (Fuente: Propia)

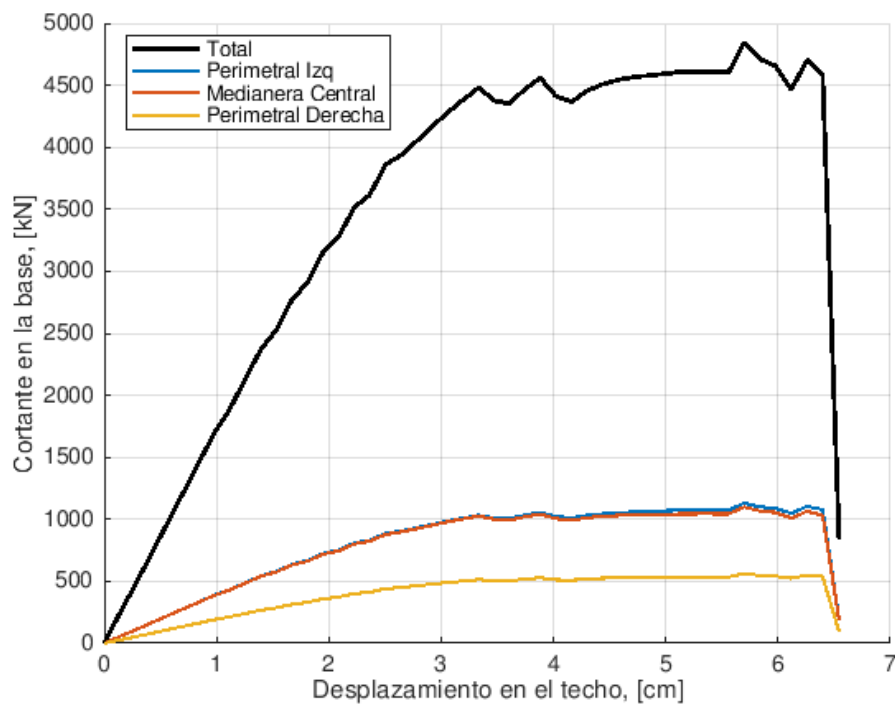


Figura A8.16. Contribución en el edificio Agregado eje Y Negativo (Fuente: Propia)